

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно – фізичний факультет

Кафедра ливарного виробництва чорних і кольорових металів

«На правах рукопису»
УДК 621.745.55

До захисту допущено
Завідувач кафедри
М.М. Ямшинський
(ініціали, прізвище)
_____ 2018 р.

(підпис)
“ ”

Магістерська дисертація

за спеціальністю – 136 – Металургія
(код і назва спеціальності)

на тему: **Розроблення технології виготовлення жаростійких
виливків із диференційованими властивостями поверхні**

Виконала: студентка 6-го курсу, групи ФЛ-61м

	<u>Скрипник Анастасія Ігорівна</u> (прізвище, ім'я, по батькові)	_____ (підпис)
Науковий керівник	<u>к. т. н., доц., Ямшинський М. М.</u> (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)	_____ (підпис)
Консультант з експериментальної частини	<u>к.т.н. доцент Федоров Г.Є.</u> (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)	_____ (підпис)
Консультант з організаційно- економічної частини	<u>к.е.н. ст. викл. Нараєвський С.В.</u> (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)	_____ (підпис)
Консультант з нормоконтролю	<u>к.т.н. доцент Федоров Г.Є.</u> (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)	_____ (підпис)
Рецензент	<u>доцент, к. т. н., Доній О. М.</u> (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)	_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без ві-
дповідних посилань.
Студентка _____
(підпис)

Київ – 2018 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Інженерно – фізичний

Кафедра Ливарного виробництва чорних і кольорових металів

Рівень вищої освіти – Другий (магістерський)

Спеціальність 136 – Металургія

Спеціалізація Ливарне виробництво та комп'ютеризація процесів лиття

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

М.М.Ямшинський

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2018 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТЦІ**

Скрипник Анастасії Ігорівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Розроблення технології виготовлення жаростійких виливків із диференційованими властивостями поверхні»

Науковий керівник Ямшинський Михайло Михайлович, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 22 » березня 2018 р. № 994-с

2. Строк подання студентом дисертації 15 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: Технологічні процеси виробництва жаростійких виливків з диференційованими властивостями поверхневим легуванням

4. Предмет дослідження: Товщини легувального покриття і легованого шару, властивості легованого шару, структура легованого шару

5. Перелік питань, які потрібно розробити: 5.1 Виконати літературний огляд за темою дисертації. 5.2 Дослідити вплив легувальних елементів на жаростійкість сплавів на основі заліза. 5.3 Оптимізувати методику дослідження. 5.4 Визначити оптимальний склад наповнювача легувального покриття. 5.5 Вивчити вплив легувальних покриттів різного функціонального призначення на товщину та твердість легованого шару. 5.6 Вивчити структуру та визначити індекс забрудненості легованого шару неметалевими вкраплинами. 5.7 Розробити організаційно-економічну частину роботи. 5.8 Розробити бізнес-проект. 5.9 Сформулювати загальні висновки та рекомендації.

6. Перелік ілюстративного матеріалу : Постановка задач і методики дослідження (3 слайди); результати експериментів (12 слайдів); висновки

(2 слайди).

7. Перелік публікацій: 7.1 «Чавуни зі спеціальними властивостями»/ Скрипник А.І., Гурія І.М./ VIII Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2016 (НТУУ «КПІ», м. Київ). 7.2 «До питання розроблення технологій виготовлення виливків із диференційованими властивостями поверхні»/ Скрипник А.І., Федоров Г.Є./ IX Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2017 (НТУУ «КПІ», м. Київ). 7.3 «До питання розроблення технології виготовлення жаростійких виливків із диференційованими властивостями поверхні»/ Скрипник А.І., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є./ X Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2018 (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ)

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Експериментальна частина	Федоров Г.Є., доцент		
Організаційно-економічна частина	Нараєвський С.В., старший викладач		

9. Дата видачі завдання 5 лютого 2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Переддипломна науково-дослідна практика	05.02...07.03.18 р.	
2	Аналітичний огляд літератури	05.02...01.03.18 р.	
3	Удосконалення методик дослідження	07.03...14.03.18 р.	
4	Проведення плавок	14.03...18.03.18 р.	
5	Оброблення зразків	18.03...24.03.18 р.	
6	Випробування зразків	24.03...04.04.18 р.	
7	Обговорення результатів досліджень	04.04...08.04.18 р.	
8	Побудова графічних залежностей	08.04...23.04.18 р.	
9	Формулювання висновків	23.04...25.05.18 р.	
10	Оформлення дисертації та презантації	25.04...14.05.18 р.	
11	Рецензування дисертації	15.05...18.05.18 р.	
12	Захист дисертації	22.05.2018 р.	

Студентка

_____ (підпис)

Скрипник А.І.

_____ (прізвище, ініціали)

Науковий керівник

_____ (підпис)

Ямшинський М.М.

_____ (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 96 с., 22 рис., 10 табл., 31 посилання.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виробництва жаростійких виливків з диференційованими властивостями поверхневим легуванням.

Предмет дослідження – товщини легувального покриття й легованого шару, властивості легованого шару, структура легованого шару.

Мета роботи – розроблення теоретичних і технологічних основ виготовлення жаростійких виливків з вимоговими властивостями в окремих їх частинах на основі використання поверхневого легування на підставі новітніх досягнень у світовій ливарній науці з подальшою реалізацією розроблених технологій у промисловості.

Методи дослідження – у роботі використано сучасні методики визначення спеціальних властивостей сплавів.

Результати досліджень – для отримання якісного легованого шару необхідної товщини і твердості при поверхневому легуванні доцільно використовувати як легуючі покриття окремі феросплави або механічні суміші. Поверхнєве легування дає можливість істотно заощадити дорогі й дефіцитні феросплави, які використовують під час об'ємного легування.

Ступінь впровадження – лабораторні випробування.

Область застосування – виготовлення виробів, що працюють при підвищених температурах і в умовах агресивного середовища методами поверхневого легування.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – отримання жаростійких виробів з використанням поверхневого легування; використання технології для покращення жаростійких властивостей сплавів на основі заліза.

ЖАРОСТІЙКЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЛЕГУВАННЯ, АЛЮМІНІЄВИЙ ПОРОШОК, ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИЙ ФЕРОХРОМ, ДИФЕРЕНЦІЙОВАНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЛЕГОВАНИЙ ШАР.

ABSTRACT

Master's dissertation: 96 p., 22 fig., 11 tab., 31 references.

The object of research - technological processes of the production of heat-resistant castings with differentiated properties by surface doping.

The subject of research - thickness of the doping coating and the alloyed layer, the properties of the alloyed layer, structure of the alloyed layer.

The aim of the work - development of theoretical and technological foundations for the production of heat-resistant castings with the requisite properties in their separate parts on the basis of the use of surface doping on the basis of the latest achievements in the world of foundry science with the further implementation of the developed technologies in the industry.

Research methods - modern methods of determining the special properties of alloys are used in the work.

Research results - for obtaining a qualitative alloyed layer of required thickness and hardness for surface doping, it is advisable to use individual ferroalloys or mechanical mixtures as alloying coatings. Surface doping makes it possible to significantly save expensive and scarce ferroalloys that are used during volumetric doping. Surface doping makes it possible to significantly save expensive and scarce ferroalloys that are used during volumetric doping.

The degree of implementation - the samples passed laboratory tests.

The scope of application - manufacture of products that work at elevated temperatures and under aggressive environments by methods of surface doping.

Foreseeable assumptions - obtaining heat-resistant products using surface doping; use of technology to improve the heat-resistant properties of iron-based alloys.

HEAT-RESISTANT SURFACE DOPING, ALUMINUM POWDER, HIGH-CARBON FERROCHROME, DIFFERENTIATED PROPERTIES, DOPED LAYER.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	10
ВСТУП.....	11
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПИТАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	13
1.1 Промислові жаростійкі сплави й вимоги, які до них пред'являють.....	13
1.2 Вплив легувальних елементів на жаростійкість сплавів на основі заліза.....	15
1.3 Методи виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні і окремих частин литої заготовки.....	18
1.3.1 Поверхневе легування як метод виробництва виливків з диференційованими властивостями поверхні.....	22
1.3.2 Технологія поверхневого легування.....	28
1.3.3 Кінетика поверхневого легування та її різновиди.....	30
1.4 Висновки і постановка завдання досліджень.....	32
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	34
2.1 Підготовки вихідних матеріалів для поверхневого легування.....	34
2.2 Виплавлення базового сплаву.....	36
2.3 Вибір зразків та методика дослідження процесів поверхневого легування.....	37
2.4 Технологія нанесення легувального покриття на робочі поверхні форм і стрижнів.....	44
2.5 Висновки до розділу 2.....	45

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ	
ВИЛИВКІВ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	
ПОВЕРХНІ.....	46
3.1 Визначення оптимального складу та фракції	
наповнювача покриття.....	46
3.2 Дослідження процесів кристалізації легованого шару.....	46
3.3 Вплив фракції наповнювача на товщину легованого	
шару.....	48
3.4 Вплив фракції ферохрому на товщину легованого шару....	49
3.5 Вплив складу та фракції наповнювача на	
мікротвердість легованого шару.....	51
3.6 Вплив наповнювача покриття на товщину легованого	
шару.....	53
3.7 Вплив товщини покриття на товщину легованого шару...54	
3.8 Вплив зв'язувальних компонентів	56
3.8.1 Вплив зв'язувальних компонентів на товщину	
та мікротвердість легованого шару.....	56
3.8.2 Вплив зв'язувальних компонентів на якість	
легованого шару.....	58
3.8.3 Вплив зв'язувальних компонентів на розподіл	
неметалевих краплин.....	59
3.9 Визначення оптимального складу легувальних	
покриттів.....	60
3.10 Дослідження окислостійкості легованого шару.....	64
3.11 Висновки до розділу 3.....	67
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО – ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	69
4.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження.....	69
4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження.....	71
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	71
4.2.2 Єдиний соціальний внесок.....	73

4.2.3 Витрати на спеціальне обладнання.....	73
4.2.4 Матеріали, необхідні для проведення досліджень.....	74
4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій.....	74
4.2.6 Витрати на службові відрядження.....	75
4.2.7 Інші прямі невраховані витрати.....	75
4.2.8 Накладні витрати.....	75
4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	76
4.3 Економічна ефективність роботи.....	77
4.4 Висновки до розділу 4.....	80
5 БІЗНЕС-ПРОЕКТ.....	81
5.1 Склад команди.....	81
5.2 Назва проекту.....	81
5.3 Короткий опис проекту.....	81
5.4 Бізнес-модель.....	82
5.4.1 Цінний продукт.....	82
5.4.2 Сегмент споживачів.....	83
5.4.3 Канали збуту.....	83
5.4.4 Взаємодія зі споживачами.....	84
5.4.5 Прибуток (монетизація)	84
5.4.6 Ключові види діяльності.....	84
5.4.7 Ключові ресурси.....	85
5.4.8 Ключові партнери.....	85
5.4.9 Витрати.....	85
5.5 Споживчі властивості товару.....	86
5.6 Дослідження ринку.....	86
5.7 Дослідження конкурентного оточення.....	86
5.8 Маркетингова стратегія просування.....	87
5.9 Елементи фінансового плану.....	87
5.9.1 Опис бізнес-проекту.....	87

5.9.2 Опис товару/послуги/технології	88
5.9.3 Маркетинг та продаж.....	88
5.9.4 Фінансовий план.....	88
5.9.5 Резюме.....	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	93
ДОДАТКИ.....	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

HRA – твердість за методом Роквелла, шкала «А»

мас. ч. – масова частина

РЗМ – рідкісноземельні метали

с – секунда

год – година

М – модуль рідкого скла

г/см³ – грам на кубічний сантиметр

ЛСТ – технічний лігносульфонат

ВСТУП

До деталей сучасних машин і механізмів пред'являють підвищені вимоги щодо твердості, стійкості проти корозії і ерозії в різних агресивних середовищах тощо. Більшість таких деталей виготовляють з використанням литих заготовок, тобто виливків. Термін служби окремих литих деталей значною мірою визначає надійність машин, їх продуктивність та тривалість експлуатації.

Аналіз експлуатації великої кількості литих деталей машин і механізмів, які працюють в умовах інтенсивного зносу, високих температур і агресивних середовищ (теплоенергетика, металургія, гірничозбагачувальна і хімічна галузі тощо), показує, що технології їх виготовлення з використанням об'ємного легування не завжди себе виправдовують, а у багатьох випадках і шкідливі, оскільки лише невелика товщина таких деталей зношується, окиснюється або ушкоджується. Це призводить до невиправданих витрат дорогих високолегованих сплавів. Наприклад, аналіз показників витрати металу на одиницю виробленої електроенергії тепловими електростанціями України показує: щорічно безповоротно втрачаються тисячі тонн металу литих деталей високої собівартості. У цих випадках достатньо було б забезпечити високі експлуатаційні характеристики тільки робочих поверхонь таких деталей.

Для досягнення високої поверхневої міцності і зносостійкості литих деталей в машинобудуванні використовують різні види оброблення: термічне, хіміко-термічне, лазерне тощо, а також застосовують електрохімічні покриття і наплавлення на поверхні виробів металу із спеціальними властивостями. Проте багатьма з цих методів не вдається одержати шар з потрібними властивостями завтовшки більше 0,3 мм, що недостатньо, особливо для тривалої експлуатації крупних деталей. Практика показує, що товщина поверхневого шару із спеціальними властивостями повинна бути не менше 5...10 мм. Наплавленням на поверхні деталі можна одержати шар такої

товщини, але цей процес дуже трудомісткий, дорогий і, крім того, на деяких поверхнях деталей наплавлення металу здійснити практично неможливо.

Для реалізації цієї проблеми перспективними можуть бути способи виробництва виливків із нелегованих сплавів на основі заліза з поверхневим композиційним або легованим шаром, який утворюється під час формування виливка в ливарній формі.

Для жаростійких сплавів головною вимогою є чітке встановлення співвідношення основних легувальних елементів, які надають сплавам високу окислостійкість і термостійкість. У той же час до хімічного складу, структури та механічних властивостей металу основи, яка не контактує з агресивним високотемпературним середовищем, пред'являють інші вимоги, наприклад, відсутність карбідоутворюючих хімічних елементів, м'яка пластична ударостійка або не жаростійка перлітна металева матриця. Отже, виходячи з умов експлуатації, такі деталі повинні мати диференційовані властивості металу в різних частинах, в тому числі і поверхні. Саме для виробництва таких деталей можуть бути використані процеси поверхневого легування.

Отже тема магістерської дисертації, яка спрямована на розроблення теоретичних і технологічних основ диференціації властивостей виливка методами поверхневого легування сплавів на основі заліза, є актуальною.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПИТАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Промислові жаростійкі сплави й вимоги, які до них пред'являють

Хромисті жаростійкі сталі. Ці сталі є найбільш економічними як з точки зору легування так і широкого використання в різних галузях техніки як неіржавкого корозійностійкого і окалиностійкого матеріалу.

Залежно від хімічного складу та структури їх ділять на такі групи:

- напівіржавкі (теплостійкі) хромисті сталі (з 5...10% Cr), вироби з яких після гартування на мартенсит використовують, переважно, в нафтовій промисловості;
- сильхроми і інші клапанні хромисті сталі;
- неіржавкі хромисті сталі (з 12...13% Cr), які піддають гартуванню на мартенсит і використовують в різних галузях техніки;
- складнолеговані неіржавкі сталі з 12...17% Cr, які використовують для виготовлення литих деталей хімічного і пічного устаткування;
- неіржавкі і кислотостійкі хромисті сталі (16...20% Cr) напівферитного і феритного класів, вироби з яких використовують в хімічному машинобудуванні та устатковані, що працює при підвищених (до 800...850 °C) температурах;
- хромисті жаростійкі сталі (з 25...33% Cr) феритного класу, які використовують для виготовлення виробів, що працюють до 1000 °C;
- хромоазотовані неіржавкі сталі – мають широкий спектр використання – від агресивних середовищ до високих температур;
- хромисті жаростійкі сталі з добавками алюмінію, кремнію, титану, азоту і інших легувальних елементів: використовують для виготовлення литих деталей пічного устаткування;
- хромисті сталі з алюмінієм - хромоалюмінієві сталі – складають окрему групу сталей із спеціальними властивостями.

На відміну від нелегованих сталей, хромисті мають підвищену сталість механічних і спеціальних властивостей після відпуску, що взагалі характерно для сталей, легованих карбідоутворювальними елементами.

У хромистих сталях, як і в інших, що вміщують карбідоутворювальні елементи, завжди вдається здійснити повне виокремлення і формування карбідів під час відпуску мартенситу або під час нагрівання після перетворення. Це робить сталь м'якою і легко оброблюваною. Останнє має особливе значення для використання хромистих сталей в техніці для виготовлення дрібних деталей паливоспалювальних пристроїв.

Хромоалюмінієві сталі. Значний ріст виробництва литих деталей із легованих жаростійких сталей почався в 30-ті роки минулого століття, коли було відкрито, що додавання в залізохромисті і залізохромонікелеві сплави до 10% Al суттєво (в деяких випадках на багато разів) збільшує окалинотійкість цих сплавів і підвищує тривалість експлуатації виробів. Дослідженнями впливу алюмінію на окалинотійкість заліза установлено, що присадка біля 2% Al до заліза помітно знижує втрати сплаву на утворення окалини і що такий сплав з 8% Al має такий же високий опір окисненню, як і нікельхромо-вий сплав з 80% нікелю і 20% хрому [1].

Жаростійкість потрібних сплавів Fe-Cr-Al вивчали дією на них температури від 1000 до 1450 °C [2, 3]. При цьому було встановлено, що хром впливає менш інтенсивно на жаростійкість, ніж алюміній. Наприклад, втрати маси сплавом, що вміщує 10% Cr і 10% Al, менші, ніж сплавом, який вмістить 50% хрому і 5% алюмінію тобто жаростійкість з пониженням алюмінію погіршується [2].

Отже алюміній сприяє значному підвищенню жаростійкості хромистої сталі, що пояснюється високою швидкістю дифузії алюмінію в фериті на поверхню виробу і низькою іонною проникністю оксидного шару Al_2O_3 . Ці фактори і обумовлюють зниження швидкості процесів окалиноутворення, оскільки на поверхні металу формується окалина із оксидів хрому і алюмінію типу шпінелі ($FeO \cdot Cr_2O_3$; $FeO \cdot Al_2O_3$).

Відсоткове відношення Al_2O_3 і Cr_2O_3 в шпінелі визначається концентрацією в сталі вказаних елементів і температурою окиснення [4].

Завдяки високій окисностійкості, маловуглецеві хромоалюмінієві сталі, які вміщують 25...30% Cr і 1...10% Al складають одну із важливих груп промислових сплавів, що працюють при температурах вище 1100 °C [3].

До сплавів, які використовують для виготовлення жаростійких і зносо-стійких литих деталей, пред'являють, перш за все, вимоги щодо їх хімічного складу та ливарних властивостей. Тому теоретичний і практичний інтерес представляє вивчення поведінки окремих хімічних елементів в сплавах на основі заліза.

1.2 Вплив легувальних елементів на жаростійкість сплавів на основі заліза

Хром. Хром відноситься до елементів які звужують γ -область. Позитивний вплив, який здійснює хром на жаростійкість сталей шляхом утворення захисних плівок Cr_2O_3 , сприяє широкому використанню його в сталях, вилити з яких працюють під дією високої температури. Чим більший вміст хрому в сталі, тим більш високу корозійну стійкість вона має, а тому температурний інтервал експлуатації таких сталей однозначно залежить від вмісту хрому.

Хром використовують не тільки для легування жаростійких сталей, але і жароміцних. Найкращі показники повзучості сталі досягаються після додавання в сталь біля 12% хрому. Більш високі концентрації хрому в сталі знижують твердість, оскільки з підвищенням вмісту хрому утворюється малостійкий тригональний карбід Cr_7C_3 , максимальна кількість якого досягає 7%, а після додавання в сталь понад 12% Cr він призводить до утворення більш стійкого кубічного карбиду Cr_{23}C_6 [5].

Сталі з вмістом хрому більше 13% набувають певної жаростійкості. Наприклад сталь з 30% Cr під дією 1200 °C має таку ж окисностійкість, як

сталь з 9...10% Cr при температурі 900 °C. Такий зв'язок між температурою, окалиностійкістю та вмістом хрому в сталі справедливий для окиснювального середовища [6]. Для експлуатації виробів в умовах агресивних середовищ та більш низьких температур сталі можуть мати дещо менший вміст хрому.

Підвищення вмісту хрому сприяє покращанню рідкотекучості і зниженню лінійної усадки сталей, але при цьому зростає об'ємна усадка, підвищується кількість дефектів усадкового характеру, що понижує механічні властивості металу.

Хром негативно впливає на теплопровідність сталі, коли він знаходиться в рідкому металі. Така дія хрому призводить до росту первинного зерна під час кристалізації, а в умовах експлуатації виробів – до накопичення напружин, оскільки завжди існує вірогідність теплових змін.

Кремній. Покращує окалиностійкість хромистих сталей внаслідок утворення на поверхні металу під дією високих температур оксидного шару SiO_2 , через який дифузія іонів проходить повільніше, ніж через плівки оксидів Cr_2O_3 та шпінелі типу $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$. Кремній додають у сталі для підвищення окалиностійкості виробів, які працюють до 1000 °C. Кремній сприяє підвищенню рідкотекучості хромистих і хромонікелевих сталей внаслідок утворення легкоплавких силікатних сполук при наявності в цих сталях кремнію до 0,6%. Але кремній, як неметал, дуже сприяє зниженню теплопровідності, збільшує об'єм усадкових раковин у виливках [7, 8].

Неметалеві краплини у вигляді силікатів і оксиду SiO_2 суттєво знижують пластичність сталей навіть при кімнатних температурах.

Дослідженнями термостійкості хромоалюмінієвих сталей з 2% Si при високих температурах і незначних температурних перепадах встановлено, що кремній майже вдвічі знижує термостійкість сталі внаслідок крупного первинного зерна і низької теплопровідності.

Отже кремній є корисним в хромистих і хромоалюмінієвих сталях тільки в невеликій кількості (до 1%), незважаючи на те, що він сприяє покращанню рідкотекучості.

Слід зазначити, що кремній найбільш позитивно впливає на підвищення жаростійкості, коли виріб працює в окиснювальній атмосфері.

Алюміній. Має високу хімічну спорідненість до кисню, утворює на поверхні виробу тверду захисну плівку оксидів Al_2O_3 або шпінелі $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ з температурою плавлення біля 2050°C .

Поєднання у чавуні $2\ldots 6\%$ Cr і $6\ldots 7\%$ Al забезпечує одержання високої жаростійкості металу аж до 1000°C , а додавання $10\ldots 12\%$ Cr підвищує температуру експлуатації виробів до $1100\ldots 1200^\circ\text{C}$. Якщо сплав вмістить $11\ldots 18\%$ Al і $15\ldots 20\%$ Cr, то за даними Бобро Ю.Г. [6] такий чавун не має рівного собі сплаву на залізній основі щодо окалиностійкості та ростостійкості під дією температур до 1200°C . Особливо високу окалиностійкість має сплав 200X30Ю6 (30% Cr, 6% Al, 2% C) при температурах експлуатації до 1200°C [5].

Недоліком сплавів з підвищеним вмістом алюмінію ($8\ldots 20\%$) є їх висока твердість і погана оброблюваність. Поверхневі шари окалини сталей, легованих такою кількістю алюмінію, стають твердими і відшаровуються під дією незначних ударів і змін температури.

Алюміній широко використовують як розкиснювач під час виплавлення будь-яких сталей.

Титан. Широко використовують не стільки для підвищення жаростійкості і жароміцності сталей, скільки для подрібнення первинного зерна, оскільки він утворює в розплаві карбіди і нітриди, які мають високу температуру плавлення і слугують додатковими центрами кристалізації [4].

Однозначних рекомендацій щодо використання титану, як окалиностійкого матеріалу в жаростійких сталях, в літературі немає.

Вуглець. Відноситься до елементів, які розширюють область існування γ -заліза. Розширюючи область γ -твердого розчину і утворюючи карбіди з високою міцністю міжатомних зв'язків, вуглець є ефективним зміцнювачем будь-якої сталі. Його вплив на підвищення твердості виробу в умовах експлуатації визначається термічною стійкістю карбідних фаз, які утворюються

в процесі кристалізації і склад яких залежить від кількості в сталі карбідоутворювальних елементів [4, 7].

У сталях, які працюють тривалий час, негативний вплив підвищеного вмісту вуглецю виявляється тільки тоді, коли більш інтенсивно проходить перерозподілення легувальних елементів між твердим розчином та карбідною фазою. Вуглець негативно впливає на пластичність, понижує опір поширенню тріщин, а також понижує зварюваність сталі.

Окалиностійкість феритних сталей з 30% Сг і високим вмістом вуглецю, а значить з великим вмістом розчинюваних карбідів, понижується з підвищенням вмісту вуглецю внаслідок відбирання вуглецем частини хрому, який міг би утворювати твердий жаростійкий розчин.

Рідкісноземельні метали. Для покращення технологічності і підвищення жаростійкості високолегованих сталей й сплавів необхідно понизити або повністю видалити легкоплавкі елементи, які негативно впливають на експлуатаційну здатність металу. Для цього використовують рідкісноземельні метали, які переводять легкоплавкі сполуки у тугоплавкі і сприяють спливанню їх із металу у шлак.

Тому підвищення окалиностійкості і зносостійкості спостерігається уже навіть після додавання в сталь від 0,05 до 0,20% РЗМ. Тривалість експлуатації виробів, виготовлених із сталі, обробленої РЗМ, підвищується в 5...10 разів [4...6].

1.3 Методи виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні і окремих частин литої заготовки

Одним із резервів підвищення експлуатаційних властивостей виливків є утворення на їх поверхні шару металу, який мав би особливі, раніше запрограмовані, структуру і службові властивості. Формування робочого шару композиційних виливків найбільш часто здійснюють методом поверхневого легування з використанням різних обмазок або армуванням поверхні виливка

вставками, попередньо виготовленими різними способами (штамповкою, гальванопластикою, механічним обробленням, точним литтям тощо) [7].

Поверхнєве легування дозволяє впливово підвищити властивості виливків внаслідок керування процесами структуроутворення поверхневого шару [8].

За типом матеріалів, які використовують, відомі способи поверхневого легування можна розділити на три групи:

- легування за допомогою феросплавів;
- легування за допомогою тугоплавких матеріалів (карбідів, нітридів, оксидів);
- легування з використанням чистих металів або спеціальних лігатур.

Поверхнєве легування здійснюється шляхом нанесення на поверхню виливка легувального компонента (припилу, пасти, фарби). Рідкий метал, який заливають у форму, вступає у взаємодію з припилом, пастою або фарбою. Останні розчиняються в ньому і утворюють легований шар, властивості якого відрізняються від матричного металу. Таким способом за літературними даними [9...15] можна отримати легований шар товщиною до 7...12 мм.

Інтенсивність протікання процесу легування визначається ступенем перевищення температури основного металу над температурою нульової рідкотекучості, відношенням товщини стінки виливка і покриття.

Проте, чим більша різниця температур перегрівання основного металу і плавлення покриття, тривалість їх взаємодії і менша товщина покриття, тим більшою мірою понижається вміст легувальних елементів в робочому шарі, а експлуатаційні характеристики підвищуються незначно.

У випадку використання легувальних покриттів, у яких температура плавлення вища або близька до температури рідкого металу, що заливається у форми, провідною стадією процесу поверхневого легування є проникнення рідкого сплаву в пори покриття. Сплав, що проникає у легувальне покриття, розчиняє тверді металічні частини, при цьому відбуваються зміни хімічного

складу сплаву, на межі розподілу покриття-метал основи. Визначальними процесами при цьому є дифузійні.

Інтенсивність розчинення часточок легувального покриття, серед інших факторів, визначається перш за все швидкістю проникнення основного сплаву капілярами, які характеризуються розмірами часточок складових легувального покриття.

Як тверді складові легувальних обмазок нерідко використовують карбіди та нітриди металів [9, 15]. Суміші карбідів WC, TiC, WC, W₂C, Cr₃C₂, TiN, ZrC, замішані на рідкому склі, просочували сталями 5ХНМ та Р18, білим і сірим чавунами [15]. При цьому встановлено, що оксиди легувальних елементів і водний розчин рідкого скла утворюють неметалеві вкраплини, частина яких спливає на поверхню легованого шару, а інша частина залишається в легованому шарі, розташовується на межі розділу легувальне покриття-основа металу. При додаванні [15] до високовуглецевого ферохрому 4% корунду при легуванні поверхні виливків одержані позитивні результати, але спосіб не знайшов широкого використання через слабкий зв'язок легованого шару з основним металом.

Відомий також спосіб легування виливків шляхом нанесення на поверхню форми або стрижня легувальних елементів у вигляді тонкої металевої плівки, яка утворюється внаслідок термічного розпаду карбонідів відповідних металів. Для нанесення плівки пари вказаних сполук в суміші з інертним газом продувають через порожнину нагрітих ливарних форм. Технологія дозволяє отримати на поверхні форми декілька послідовно розташованих шарів або один шар із суміші різних металів для складного легування. Проте ця технологія є дорогою для серійного виробництва.

Для виливків із складною конфігурацією з метою покращання службових характеристик поверхневий композиційний шар отримують, використовуючи армувальні вставки у вигляді пористих металокерамічних оболонок або виготовлених із іншого (зносоустійкого або жароміцного) матеріалу.

Використання для композиційного литва вставок, спечених із порошків металів, має ряд особливостей порівняно із вставками на зв'язувальних компонентах. Відсутність неметалевих краплин, можливість формування композиційного шару на вертикальних поверхнях виливків у формі, відсутність спікання і розривання оболонки, зберігання заданого розташування компонентів в структурі композиційного шару і відсутність газових раковин на поверхні виливка дають можливість вважати такий спосіб за перспективний [15].

Для якісного і повного просочування, пористі оболонки занурюють в матричний метал через шар флюсу.

Другий метод просочування оболонок [16] передбачає виготовлення своєрідного “сирця – оболонки” із термопластичного шлікера із більш тугоплавких металічних порошків і ливникову систему із шлікера із менш тугоплавких порошків металу. Спікання такого “сирця” здійснюють в засипці, але без герметизувального затвора, оскільки продукти неповного згоряння пластифікатора утворюють захисну атмосферу на час, достатній для розігрівання заготовки до температури плавлення металу ливникової системи. Потім такі оболонки з попередньо-заповненими порами встановлюють в ливарну форму і заливають матричним металом, з'єднуючи їх внаслідок механічних і дифузійних зв'язків [9].

Відомі роботи [17...19] щодо виготовлення виливків шляхом заливання рідкого металу на механічно оброблену тверду непористу вставку. Цей спосіб отримав найбільше поширення для фасонних виливків із чорних сплавів з перехідною зоною сталь – чавун, сталь – сталь, чавун – чавун. Для отримання міцного з'єднання вставки з основним металом важливо правильно вибрати її товщину і температуру металу перед заливанням.

Описані методи армування виливків твердими непористими вставками дозволяють вирішити деякі конструктивні і технологічні задачі – здійснювати місцеве зміцнення і підвищення жаростійкості, тобто оберігати виливки від корозії, економити дефіцитні матеріали, підвищувати якість оброблення і знижувати у багатьох випадках собівартість виливків.

Для виготовлення прес-форм для лиття за моделями, що витоплюються, крім гальванопластикових оболонок, використовують оболонки, отриманих плазмовим напиленням різних порошків металів на металеві і гіпсові моделі [20]. Утворену оболонку товщиною 0,15...0,5 мм заливають легкоплавким сплавом або засипають металевим порошком з наступним спіканням.

Одним із шляхів підвищення технологічності виготовлення деталей є заміна частин виливка простої або нескладної форми елементами, виготовленими волочінням або прокатуванням, а також безперервним литтям [9].

Проте аналіз літератури показує, що використання композиційних виливків в промисловості обмежене через недосконалість технологій їх виготовлення.

1.3.1 Поверхнєве легування як метод виробництва виливків з диференційованими властивостями поверхні

Можливість отримання поверхневого шару виливка з потрібними властивостями поверхневим легуванням в процесі лиття викладена у ряді робіт [21...25]. Суть цього методу полягає в тому, що на поверхні форми або стрижня, які формують у виливку місця, піддаванні, наприклад, інтенсивному зносу, наносять легувальні покриття в вигляді фарби, пасти, облицювального шару або вставок, наповнювачами в яких є відповідні легувальні елементи або їх сполуки. Залитий в форму метал взаємодіє з легувальним покриттям, в результаті чого поверхня виливка насичується відповідними елементами.

Дані щодо використання поверхневого легування для підвищення стійкості чавунних валків відомі більше ста років із праць професора Харківського університету А. Мевиуса, зокрема з його роботи “Чавуноливарне виробництво”, виданої в 1859 р. Проте процес поверхневого легування виливків безпосередньо в ливарній формі не отримав широкого промислового використання. Цьому перешкоджає незначна товщина легованого шару, дефекти по-

верхні (раковини, неметалеві краплини), нестабільність хімічного складу і властивостей, відсутність надійної і простої технології виготовлення виливків з легованою поверхнею. Очевидно це можна пояснити недостатньою вивченістю механізму процесів, які відбуваються на межі виливок-покриття.

У теперішній час уявлення щодо механізму поверхневого легування дещо змінилися.

У роботах [24, 25] механізм поверхневого легування пояснюють з точки зору переходу легувальних елементів із обмазки форми в поверхневий шар виливка наступним чином.

Заповнюючи рідким металом форму з легувальним покриттям тонкий шар останнього перетворюється в рідкий метал, але головна його маса тільки нагрівається до високої температури, внаслідок чого починаються діяти дифузійні процеси проникнення легувальних елементів, які знаходяться в обмазці, в поверхневий шар виливка. Перша частина процесу поверхневого легування здійснюється дуже швидко (максимально 10 с), в той час як дифузія елементів, особливо в твердому стані, є тривалим процесом. Через це вона може бути корисною у випадку отримання легованого шару значної товщини (10...15 мм), особливо при виробництві товстостінних виливків.

У роботах [11, 22] дифузійним процесам при насиченні поверхневих шарів виливків легувальними елементами відводиться важлива роль. Проте за основу процесу поверхневого легування прийнято плавлення матеріалу покриття. Покриття форми, що розплавляється, взаємодіє з твердою кіркою основного металу, утворюючи розплав, який згодом розплавляє кірку, внаслідок чого і відбувається легування поверхні.

Аналізуючи взаємодію металу з легувальним покриттям автори роботи [22] стверджують, що температура залитого сплаву повинна бути достатньо високою, щоб відбулося розплавлення покриття під дією тепла рідкого металу. Товщина легованого шару залежить в цьому випадку від хімічного складу покриття та його товщини. Концентраційна неоднорідність в легованому шарі призводить до розвитку дифузійних процесів. Проте до повного

вирівнювання концентрації легувальних елементів дифузія не призводить внаслідок короткого часу перебування легованого шару в рідкому стані або при високих температурах. Вирівнювання концентрації легувальних елементів по товщині шару відбувається, переважно, внаслідок механічного змішування залитого рідкого металу з компонентами покриття.

Проте можна вважати, що такий механізм легування внаслідок механічного змішування розплавлених елементів покриття в основному рідкому металі призводить більше не до поверхневого, а до об'ємного легування виливка. Крім того, вирівнювання концентрації легувальних елементів після механічного змішування також не може здійснюватись повною мірою внаслідок короткотривалості процесу легування.

За припущенням авторів [23] вирівнюванню концентрації легувальних елементів по товщині легованого шару сприяє газоутворення в легувальному покритті. Проте така точка зору щодо вирівнювання концентрації легувальних елементів в шарі не зовсім коректна, оскільки покриття перед заливанням основного сплаву добре висушується або навіть прожарюється. Крім того, якби було значне виокремлення газів, то воно призвело б до утворення газових раковин в легованому шарі. Практика цього не підтверджує.

За Бергом П.П. [23] процес поверхневого легування може здійснюватись двома шляхами: наварюванням на поверхню виливка певного шару, коли здійснюється розплавлення легувального покриття і дифузією, коли кристалеві ґратки легувального елемента і основного металу близькі за параметрами, тобто мають майже однаковий атомний радіус. Проте цим шляхом одержувати леговану поверхню необхідної товщини значно важче, оскільки процес дифузії тривалий, а час знаходження поверхні виливка в умовах високих температур незначний.

Можна вважати, що висновки цієї роботи достатньо правдиві, проте не враховується той факт, що при поверхневому легуванні виливків має місце фільтрація рідкого розплаву в капілярно-пористі тіла, якими є легувальні покриття. Фільтрація може початися після нагрівання поверхні форми до тем-

ператур, близьких до температури нульової рідкотекучості основного сплаву і останній ще має достатню високу рідкотекучість, щоб проникнути в пори покриття форми.

Дещо інші пояснення механізму поверхневого легування викладені в роботі [26]. За твердженнями авторів цієї роботи, різність температур плавлення основного металу і матеріалу покриття повинна складати 450...500 °С.

Рідкий метал, торкаючись покриття, яке уявляє собою порувате тіло, проникає в нього на незначну глибину. Просочений основним металом шар розплавляється і розчиняється під дією тепла залитого розплаву. При цьому охолоджується шар рідкого металу, що прилягає до покриття, і утворюється тверда кірка основного металу. Розплавлена частина легувального покриття, що відокремлена від утвореної кірки основного металу, починає проникати далі в прогріті шари покриття, залишаючись більш рідкотекучою у порівнянні з залитим металом. Одночасно з боку затверділої кірки основного металу утворюється шар розплавленого покриття. Нові шари покриття розплавляються послідовно із зміною складу в бік підвищення концентрації легувального елемента. Утворений при цьому шлак спливає через вузький зазор між кіркою металу і формою або відтісняється до її поверхні. Дифузійні процеси, на думку авторів, не мають вирішального значення і не відображають сутність поверхневого легування.

Представлений механізм є винятковим випадком процесу поверхневого легування виливка. При цьому авторами не враховується взаємодія розплавленого покриття форми з основним металом виливка, який твердіє.

На відміну від наведених вище робіт Вейник А.М. і Волков Ю.А. [24, 27] вважають, що основними в процесі поверхневого легування є ефект змочування легувального покриття основним металом виливка і термофільтраційний режим покриття. У випадку незмочування покриття металом виливка процес легування гальмується і легувальне покриття тільки спікається. Згодом це покриття сколюється з поверхні виливка. Взаємодію металу з легувальним покриттям автори розділяють на три окремих випадки: пе-

рший випадок відповідає умовам, коли матеріал легувального покриття має меншу температуру плавлення, ніж матеріал основи; другий – коли покриття більш тугоплавке, ніж матеріал основи і третій – коли температура плавлення легувального покриття і матеріалу основи однакові.

Автори [23, 24] вважають, що в усіх випадках основну роль в процесі легування відіграють процеси фільтрації рідкої фази металу основи в пори легувального елемента.

За умови хорошого змочування матеріалу покриття, воно просочується рідким металом основи на всю глибину і кристалізація утвореного легованого шару починається з поверхні вилівка. В цьому випадку дефекти в легованому шарі практично відсутні. Для якісного змочування рідким металом основи матеріалу покриття в його склад рекомендується вводити поверхнево-активні речовини (флюси).

Механізм впливу флюсів на процес змочування визначається по різному: одні обмежують роль флюсів очищенням поверхні твердого металу від оксидів і забруднень [27], а інші стверджують, що флюси насамперед зменшують поверхневий натяг розплавленого металу [24]. На поверхні металу, крім оксидів, знаходяться адсорбовані шари газових молекул, сліди жиркових забруднень і інше, що знижує вільну енергію поверхні твердого тіла. Якщо в склад флюсу входять компоненти, які мають сильні відновлювальні властивості, то такий флюс, очищаючи поверхню твердого металу від оксидів, підвищує поверхневий натяг і цим покращує змочування його розплавом [28].

Під час взаємодії рідкого металу з твердими матеріалами поверхні флюс сприяє очищенню від оксидів. Але покращання змочування зв'язано не тільки з підвищенням поверхневого натягу твердої поверхні, але і із зменшенням міжфазного натягу при видаленні оксидів, що утворюються між покриттям і рідким металом. При цьому утворюються однорідні металічні зв'язки. Так трактується роль флюсів в останніх роботах [29, 30].

За результатами робіт [24, 27] найбільш сприятливий вплив на процес поверхневого легування справляють такі флюси: бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), хло-

ристий натрій (NaCl), борна кислота (H_3BO_3) і їх суміш в співвідношенні 1:1:1.

Слід зазначити, що процеси фільтрації не в усіх випадках будуть мати основне значення при поверхневому легуванні. Наприклад, використання легувальних покриттів з температурою плавлення значно нижчою температури кристалізації основного металу останній використовується з невеликим перегрівом. У цьому випадку, можливо, основне значення буде мати ефект плавлення легувального покриття і його хімічна та дифузійна взаємодія з тверднучим основним металом.

Відомо [27], що фільтрація і плавлення зв'язані з тепловими явищами, які суттєво впливають на агрегатний стан речовини і визначають направлення протікання відповідних процесів. Теплові ефекти поверхневого легування вивчались в цій роботі одностороннє, для випадку, коли здійснюється фільтрація основного металу в пори легувального покриття. Теплова взаємодія основного металу майбутнього виливка з легувальним покриттям ливарної форми може визначати, яким шляхом буде здійснюватися процес легування: через фільтрацію чи через плавлення і дифузійні процеси.

Аналізуючи літературні джерела, можна запропонувати два механізми процесу поверхневого легування:

- якщо температура плавлення покриття нижча температури тверднення основного металу, то утворення легованого шару здійснюється внаслідок розплавлення покриття і його взаємодії з основним металом;

- якщо температура плавлення легувального покриття вища температури плавлення основного металу, то легований шар може формуватися внаслідок проникнення основного металу в пори покриття з наступними дифузійними процесами переносу легувальних елементів із покриття в основний метал.

1.3.2 Технологія поверхневого легування

Вітчизняними і зарубіжними вченими використовувались різні способи введення легувальних елементів в поверхневий шар виливка. Одні із них [22, 23] наносили на поверхню форми спеціальні фарби або пасти, виготовляли вставки, основу яких складали відповідні легувальні елементи; другі – на поверхні ливарної форми насипали шар порошкоподібних феросплавів [25, 28]; треті – вводили легувальні елементи в фарби або пасти, основу яких складали вогнетривкі матеріали [11, 22]; четверті [31] – покриття для легування поверхневого шару виливків готували на основі оксидів, карбідів, нітридів і інших сполук легувальних елементів, які після здійснення дисоціації або інших процесів переходили в поверхневий шар виливка.

Аналіз літературних даних показує, що одним із найбільш поширених дефектів у легувальному шарі є раковини. Щодо механізму їх утворення існують різні тлумачення. Появу відкритих раковин в легованому шарі автори роботи [11] пояснюють так: після розплавлення легувального покриття основний метал і легований шар деякий час знаходяться в рідкому стані, загальна кристалізація металу починається не з поверхні виливка, а на деякій відстані від неї, внаслідок більш високої температури початку тверднення легованого шару. Через це гази, особливо водень, проникають в легований шар і утворюють в ньому газові раковини.

Внаслідок нагрівання форми виокремлення газів починається раніше, ніж починається кристалізація металу. Проте, як загальновідомо, із зниженням температури металу розчинність газів в ньому знижується і їх потік у формі, направлений від поверхні виливка до зовнішньої поверхні форми, зростає.

Тому такий характер утворення раковин в легованому шарі нереальний.

У роботі [24] механізм утворення раковин пояснюється тим, що розплавлений легований шар ніби втягується у виливок через капілярно пористу

кірку основного металу внаслідок об'ємної усадки останнього. Це явище в багатьох випадках є більш реальною причиною утворення раковин.

Такий механізм утворення раковин наводиться і в роботі [22].

Різні пояснення причин, що призводять до виникнення дефектів у поверхневому легованому шарі, вказують на необхідність досконалого вивчення умов їх утворення та пошуку заходів для їх попередження.

За ствердженнями авторів [14, 16] здійснити поверхнєве легування чавунних виливків важче, ніж сталевих, оскільки температура кристалізації чавуну значно нижча, ніж сталі, а температура плавлення легувальних покриттів, як правило, вища за температуру чавуну перед заливанням його у форму. Автори пропонують легувати чавунні виливки використанням метало-термічних сумішей.

Поверхнєве легування котків для гусеничних тракторів здійснювали марганцем [24]. Для легування використовували легувальне покриття такого складу: феромарганець – 47%; графіт – 14%; шамот – 35%; сульфатний луг – 4%. Легований шар поверхні вилівка досягав товщини 1,5...2,0 мм.

В роботі [25] викладена технологія поверхневого легування заготовок лопаток газотурбін.

Спосіб поверхневого легування використовували для і нанесення захисних та декоративних покриттів на поверхню вилівка [11]. Для цього використовували такі покриття: порошок Ni – 75 мас. ч., вода – 24...25 мас. ч., метил-целюлоза – 10 мас. ч. Легувальне покриття наносили на внутрішню поверхню форми або на стрижень у вигляді фарби.

Автори роботи [23] запропонували спосіб поверхневого легування чавунних виливків алюмінієм шляхом заливання в ливарну форму алюмінію, деякого його видержування в формі до утворення алюмінієвої оболонки з наступним виливанням надлишку алюмінію із форми. В одержану форму з оболонкою заливали рідкий чавун.

У роботах [25, 31] описаний спосіб місцевого зміцнення окремих частин вилівка шляхом установа в потрібних місцях легувальних матеріа-

лів у вигляді пластинок товщиною 0,10...0,15 мм, стрижнів або спіралей. А автором роботи [31] запропонована така технологія: з метою одержання форми з більш міцною активною легувальною поверхнею, на гарячу модель наноситься легувальна суміш, яка вмістить пульвербакеліт або інші термоактивні смоли. Легувальний шар засипається термоактивною сумішшю і утворюється оболонкова форма за звичайним способом.

1.3.3 Кінетика поверхневого легування та її різновиди

Процес поверхневого легування може здійснюватись:

- використанням легкоплавких легувальних покриттів, температура плавлення яких нижча температури плавлення основного металу;
- використанням тугоплавких покриттів, температура плавлення яких вища, ніж основного металу.

Очевидно, що кінетика поверхневого легування буде різною.

Використання легкоплавких легувальних покриттів для процесів поверхневого легування з точки зору механізму можна представити так: після заповнення рідким металом ливарної форми з нанесеним легувальним покриттям на її поверхні утворюється тверда кірка основного металу, яка має невисоку міцність, а тому під дією металостатичного напору може прогинатися в бік покриття, оскільки останнє під дією тепла металу встигає нагрітись до високої температури і втрачає міцність. Коли кірка стає достатньо товста, її прогинання зупиняється. Це прогинання кірки компенсує повністю або частково об'ємну усадку (з урахуванням об'ємних пор) матеріалу покриття при його плавленні. Прогинання пояснюється відомий факт отримання легового шару без раковин. Під дією металу основи покриття плавиться і взаємодіє з ним, при цьому розчиняє тверду кірку за механізмом розчинення тугоплавких компонентів.

Спочатку розчинення покриття здійснюється внаслідок дифузії атомів останнього в кірку основного металу і навпаки. У результаті цього на межі

фаз утворюється легкоплавкий сплав, який переходить (при певних концентраціях) в рідкий стан, отже здійснюється розчинення рідким покриттям твердої кірки основного металу. Чим більша різниця температур основного металу і покриття, тим більш тривалий час здійснюється взаємодія між ними (рідким покриттям і твердим або твердо – рідким основним металом) на межі їх розділу, тим більше основного металу перейде в межовий розплав і тим більшою мірою знизиться вміст легувальних елементів в покритті.

Вирівнювання концентрації легувальних елементів по перерізу легованого шару здійснюється внаслідок конвективного перемішування. Дифузія елементів із покриття в основний метал і із виливка в шар обмежена, але вона призводить до розчинення твердої кірки, утворення перехідної зони і міцного зчеплення легованого шару з основним металом виливка.

При використанні тугоплавких компонентів, внаслідок значного перегрівання основного металу на початку процесу, кірка на поверхні виливка не утворюється, тепла основного металу достатньо, щоб розігріти легувальне покриття до температури, яка сприяє проникненню основного металу в пори легувального покриття. Такий процес легування можна порівняти з механізмом утворення механічного пригару. Рідкий метал, маючи феростатичний тиск, перевищує капілярний (якщо кут змочування більший 90°) і проникає в пори легувального покриття. Глибина проникнення рідкого металу до затверднення головної його маси тим більша, чим більший розмір пор в покритті і тиск металу і чим менша охолоджувальна здатність покриття. Якщо кількість тепла, яка поступає від виливка до легувального покриття, перевищує кількість тепла, яке забирає ливарна форма, то частина легувального покриття може розчинятися і таким чином здійснюється подальше проникнення рідкого металу у покриття. Проникання металу буде тривати до тих пір, поки кількість тепла, підведена до межі розділу легувальне покриття – основний метал не стане рівним або меншим, ніж кількість тепла, яку може відвести форма від цього розділу. Рідкий метал в порах легувального покриття почне взаємодіяти з зернами покриття і розчиняти їх (за механізмом розчинення рідким

металом тугоплавких складових). В цьому випадку велику роль в вирівнюванні хімічного складу по перерізу легувального шару відіграють дифузійні процеси, величина зерна і пористість легувального покриття.

Коли для поверхневого покриття використовують легувальні компоненти, температура плавлення яких трохи нижча або вища температури кристалізації основного металу виливка, то процес легування може здійснюватись або внаслідок розплавлення покриття, або внаслідок проникнення основного металу в пори легувального покриття, або одночасно здійснюються обидва процеси. Все залежить від температури перегрівання рідкого металу і різниці температур плавлення покриття і основного металу.

1.4 Висновки і постановка завдання досліджень

На підставі глибокого аналізу науково-технічної літератури можна зробити такі висновки:

1. Найбільш жаростійкими матеріалами є сплави на основі заліза (чавуни та сталі), леговані хромом, алюмінієм.
2. Високих експлуатаційних характеристик цих сплавів можна досягти не об'ємним, а поверхневим легуванням металу в окремих робочих частинах литої деталі безпосередньо у ливарній формі.
3. Наповнювачами легувальних покриттів можуть бути використані чисті метали, феросплави, лігатури або механічні суміші на їх основі: для одержання жаростійких виробів – хром, ферохроми різних марок, алюміній, феротитан, феросиліцій тощо, карбіди та борида названих хімічних елементів.
4. Процеси поверхневого легування, рецептури легувальних покриттів та технологія нанесення цих покриттів на поверхні форм і стрижнів вивчені мало і потребують глибокого дослідження.

Виходячи із вищевикладеного, в роботі поставлені такі завдання:

1. Вибрати зразки для дослідження процесів поверхневого легування та розробити технологію їх виготовлення.

2. Відпрацювати технологію поверхневого легування відповідно до сучасних уявлень про ці процеси.
3. Вивчити вплив легувальних покриттів різного функціонального призначення на товщину та твердість легованого шару.
4. Визначити оптимальні параметри процесів поверхневого легування: склад, фракції, товщини легувальних покриттів, способи нанесення їх на робочі поверхні форм і стрижнів, температури металу основи перед заливанням його у форми тощо.
5. Вивчити структуру та визначити індекс забрудненості легованого шару неметалевими вкраплинами.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Підготовлення вихідних матеріалів для поверхневого легування

Найбільш перспективними легувальними елементами, які сприяють підвищенню жаростійкості – хром алюміній, кремній, титан, РЗМ.

Оскільки чисті метали дорогі і мають, переважно, високі температури плавлення, для приготування легувальних покриттів використовували здебільшого феросплави та їх механічні суміші.

Вихідні матеріали для приготування легувальних покриттів наведенні в таблиці 2.1, а механічні суміші компонентів – в таблиці 2.2.

Слід зазначити, що приготування матеріалів для легувального покриття шляхом виплавлення лігатур не дало позитивних результатів, оскільки подрібнення кусків лігатури утруднено, а тому використовували шлях подрібнення окремих феросплавів, їх розсівання на необхідні фракції з наступним приготуванням відповідних механічних сумішей.

Подрібнення феросплавів здійснювали в металевій ступці, одержані порошки прожарювали при температурі 200...250 °С з наступним розсіванням їх на фракції відповідно до вимог ГОСТ 6613-86.

Змішування окремих компонентів суміші для одержання максимально-го гомогенного складу здійснювали в лабораторному млині.

На підставі аналізу літератури та виходячи із попередніх досліджень при визначенні складу сумішей враховували той факт, що вміст легувальних елементів у легованому шарі вилівка знижується в 2...4 рази у порівнянні з їх вмістом в легувальному покритті.

Для приготування легувальних покриттів використовували фракції окремих компонентів або їх сумішей: <02; 02; 0315; 04; 063; 1,0.

Таблиця 2.1 – Вихідні матеріали для приготування легувальних покриттів

Індекс позиції	Найменування матеріалу	Марка	ДСТУ, ГОСТ, ТУ	Хімічний склад, %						Призначення основного легувального елемента
				основного компоненту	C	Si	P	S	інші елементи	
1	Ферохром	ФХ015А	4757-91	≥ 65	$\leq 0,15$	$\leq 1,5$	$\leq 0,03$	$\leq 0,02$	–	Підвищення жаростійкості
		ФХ650А		≥ 65	$\leq 6,5$	$\leq 2,0$	$\leq 0,03$	$\leq 0,06$	–	
		ФХ800А		≥ 65	$\leq 8,0$	$\leq 2,0$	$\leq 0,03$	$\leq 0,06$	–	
2	Алюміній	A85	11069-2001	$\geq 99,85$	–	$\leq 0,06$			$\text{Fe} \leq 0,08$ $\text{Cu} \leq 0,01$ $\text{Zn} \leq 0,02$ $\text{Ti} \leq 0,008$	Підвищення жаростійкості
3	Залізний порошок	ПЖР-3	9849-86	$\geq 99,9$	–	–	–	–	–	Наповнювач легувальної суміші

Таблиця 2.2 – Суміші для приготування легувальних покриттів та їх хімічний склад

Індекс позиції	Вміст компонентів у суміші, мас. ч.					
	ФХ015А	ФХ650А	ФХ800А	А85	залізний порошок	електродний бій
1	100	—	—	—	—	—
2	—	100	—	—	—	—
3	—	—	100	—	—	—
4	—	—	—	100	—	—
5	—	—	80	20	5	1
6	—	—	70	30	5	1

Примітки:

1. У механічній суміші наведених компонентів міститься 2,0% плавикового шпату для утворення флюсу.
2. В усіх дослідах використовували залізний порошок однієї фракції - 50 мкм.

2.2 Виплавлення базового сплаву

Як базовий сплав використовували середньовуглецеву сталь 30Л (ГОСТ 977-88).

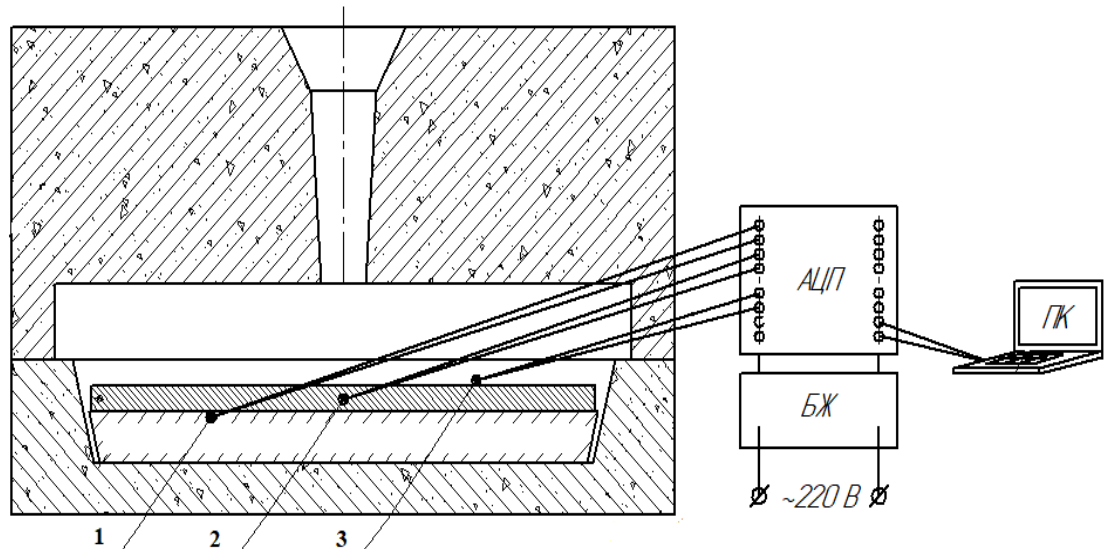
Сталь виплавляли в індукційній печі ІСТ-0,06 з місткістю тигля 60 кг і кислою футеровкою методом переплаву з використанням сталевих брухту.

Перед випусканням сталі із печі її перегрівали до 1590 ± 10 °С. Температуру визначали за допомогою вольфрам-ренієвої термопари ВР 5/20 з кварцовим наконечником безпосередньо в печі (після її вимкнення) та в ковші.

Ківш перед заливанням підігрівали в камерній печі до температури 650...700 °С. Це сприяло суттєвому зниженню утрат тепла, яке забирається

ковшом. Заливання форм здійснювали при температурі базової сталі 1570 ± 10 °C.

Для вимірювання температурних полів у формі використовували методику, показану на рисунку 2.1.



- 1 – нижня границя низу покриття – стрижень; 2 – середина покриття;
3 – верхня границя покриття – рідкий метал

Рисунок 2.1 – Схема встановлення термопар

2.3 Вибір зразків та методика дослідження процесів поверхневого легування

На підставі аналізу геометрії та розмірів литих деталей, встановлено, що середня товщина стінок виливків знаходиться в межах 30...40 мм. Тому для вивчення процесів поверхневого легування вибрані зразки з пережимами розмірами $85 \times 35 \times 40$ мм.

Легувальне покриття наносили на стрижні, виготовленні із рідкоскляної суміші (90% піску оріхівського, 4% бентоніту і 6% рідкого скла).

Розміри стрижня та стрижневого ящика показано на рис. 2.2 і 2.3.

Стрижні після виготовлення протягом доби сушили на повітрі, а потім у камерній печі при температурі 240 °C протягом двох годин.

Після охолодження стрижнів на них наносили легувальне покриття певного складу і товщини 3, 4, 5, 6, 7 мм. На кожний стрижень наносили по 5 різних покриттів за складом або товщиною.

Стрижні з нанесеним покриттям протягом доби підсушували на повітрі, а перед використанням їх прожарювали при температурі 300 °С протягом двох годин.

Блок зразків показано на рис. 2.4.

Форми виготовляли з використанням дерев'яного модельного комплексу і піщано-глинястої суміші для сталевих литва. Форму в складеному вигляді показано на рис. 2.5.

З метою попередження пригару форми фарбували дистенсиліманітовою фарбою. Для зменшення утрат тепла, яке відбирає форма від рідкого металу, здійснювали об'ємне сушіння форм у сушарці при температурі 200...250 °С. Проставлення стрижнів у форми і їх збирання здійснювали безпосередньо за декілька хвилин до заливання металом.

Після охолодження блоки зразків видалялись із форми, аналізували візуально процеси легування, очищали зразки від пригару, розбивали на частини і здійснювали попереднє оброблення їх на обдирних верстатах.

Технологія виготовлення зразків дозволяє одночасно в одній формі дослідити до 10 легувальних покриттів.

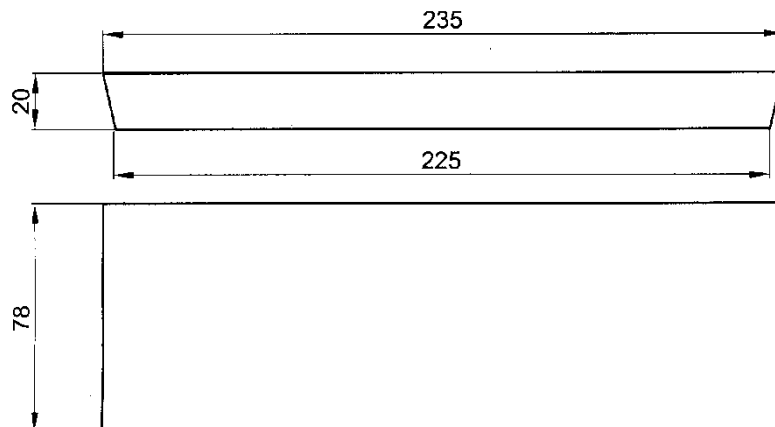


Рисунок 2.2 – Стрижень для нанесення легувального покриття

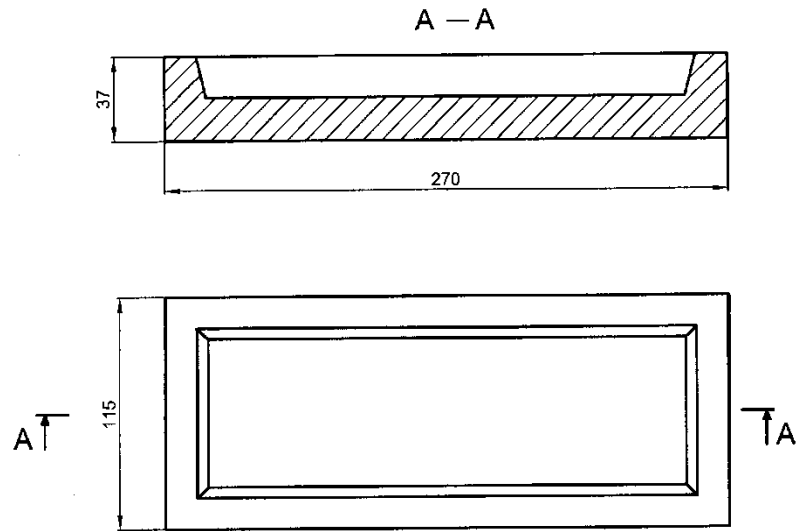
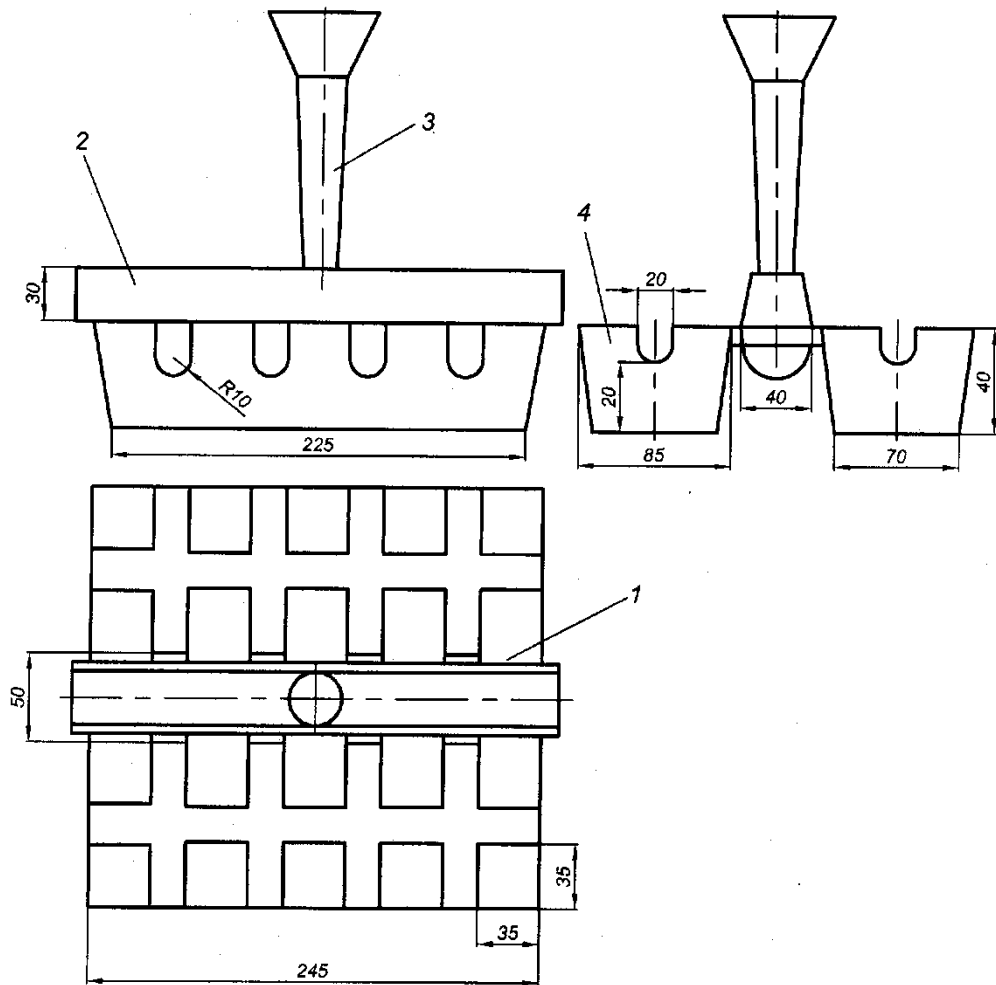
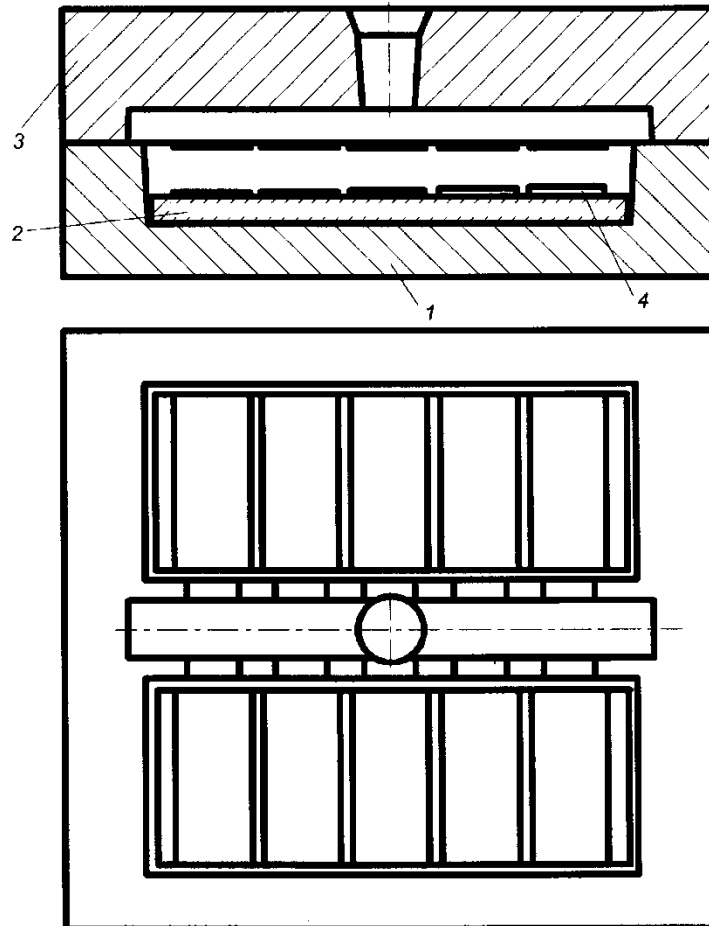


Рисунок 2.3 – Стрижневий ящик для виготовлення стрижня



1 – живильник; 2 – колектор; 3 – стояк; 4 – блок зразків

Рисунок 2.4 – Блок зразків з елементами ливникової системи



1 – нижня півформа; 2 – стрижень; 3 – верхня півформа; 4 – легувальне покриття

Рисунок 2.5 – Форма для дослідження процесів поверхневого легування в складеному вигляді (на нижній проекції стояк і колектор показані умовно)

Для визначення оптимальної швидкості заповнення ливарної форми рідким металом розраховано поперечний переріз елементів ливникової системи, для цього використана відома методика Озана – Дітерта і НТУУ “КПІ”, але з суттєвим коригуванням розмірів.

Оптимальну тривалість заливання форми визначали за формулою:

$$\tau = S^3 \sqrt{\delta \cdot Q}, \quad (2.1)$$

де S – коефіцієнт часу, визначали за таблицею 2.3;

δ – переважна товщина стінки, мм;

Q – маса металу, необхідна для виготовлення блоку зразків і ливникової системи, кг.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнта S

Рідкотекучість металу	Спосіб підведення металу у форму		
	знизу сифоном в товстостінні частини вилівка	на 0,5 висоти або ступінчастий комбінований	зверху рівномірне підведення в тонкостінну частину
Нормальна	1,3	1,4	1,5...1,6
Підвищена	1,4...1,5	1,5...1,6	1,6...1,8

Площу перерізу живильників визначали залежно від способу заливання металу в форму. При заливанні форм за допомогою ковша з носиком:

$$F_{\text{жив}} = \frac{Q}{\mu \cdot \tau} \cdot 0,3 \sqrt{H_{\text{cp}}}, \quad (2.2)$$

де μ – загальний коефіцієнт опору форми, визначали за таблицею 2.4.

$$H_{\text{cp}} = H_{\text{ст}} - \frac{h_{\text{в}}^2}{2h_{\text{в1}}} - \text{середній розрахунковий напір} \quad (2.3)$$

де $H_{\text{ст}}$ – висота стояка від рівня воронки до живильника, см;

$h_{\text{в}}$ – висота вилівка від верхньої крайки живильника до найвищої точки вилівка, см;

$h_{\text{в1}}$ – загальна висота вилівка в формі, см.

При заливанні зверху, $h_{\text{в}} = 0$, тоді $H_{\text{cp}} = H_{\text{ст}}$.

При сифонному заливанні форми, $h_{\text{в}} = h_{\text{в1}}$, тоді $H_{\text{cp}} = H_{\text{ст}} - h_{\text{в}}/2$.

При підведенні по розніму форми, коли $h_{\text{в}} = 0,5h_{\text{в1}}$, тоді $H_{\text{cp}} = H_{\text{ст}} - h_{\text{в}}/8$.

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнта μ

Формування виливка	Опір форми		
	високий	середній	малий
По-сухому	0,3	0,38	0,5
По-сирому	0,25	0,32	0,42

З урахуванням специфіки заливання форм (висока швидкість заповнення форми для менших утрат температури металом основи), площі поперечних перерізів колектора, F_k , і стояка, $F_{ст}$, визначаємо із співвідношення:

$$F_{жив} : F_k : F_{ст} = 1,6 : 1,5 : 1,0 \quad (2.4)$$

Оптимальну тривалість заливання форми визначали за формулою (2.1):

$$\tau = 1,55 \sqrt[3]{40 \cdot 13,6} = 12,65 \text{ с}$$

де $S = 1,55$ – вибирали за таблицею 2.3;

$\delta = 40$ мм – середня товщина виливка;

$Q = 13,6$ – маса блока зразків з ливниковою системою, кг.

Коефіцієнт опору вибирали за табл.2.4.

Оскільки опір форм середній, то $\mu = 0,32$.

Середній розрахунковий напір:

$$H_{cp} = H_{ст} - h_{вл}/8, \quad (2.5)$$

оскільки використано підведення металу по розніму форми:

$$H_{cp} = 24 - 4/8 = 23,5 \text{ см},$$

тоді:

$$F_{\text{жив}} = 13,6 / 0,32 \cdot 12,65 \cdot 0,3 \cdot \sqrt{23,5} = 21,0 \text{ см}^2;$$

$$F_{\text{к}} = 19,7 \text{ см}^2;$$

$$F_{\text{ст}} = 13,1 \text{ см}^2$$

Перерізи елементів ливникової системи:

$$F_{\text{жив}} = \left(\frac{a+b}{2} \right) \cdot h,$$

$$F_{\text{жив}} = \left(\frac{2,8+3,2}{2} \right) \cdot 0,7 = 2,1 \text{ см}^2$$

Кількість живильників – 10 шт:

$$\Sigma F_{\text{жив}} = 21,0 \text{ см}^2,$$

$$F_{\text{к}} = \left(\frac{a+b}{2} \right) \cdot h = \left(\frac{2,8+3,2}{2} \right) \cdot 3,0 = 9,9 \text{ см}^2$$

Кількість колекторів – 2 шт:

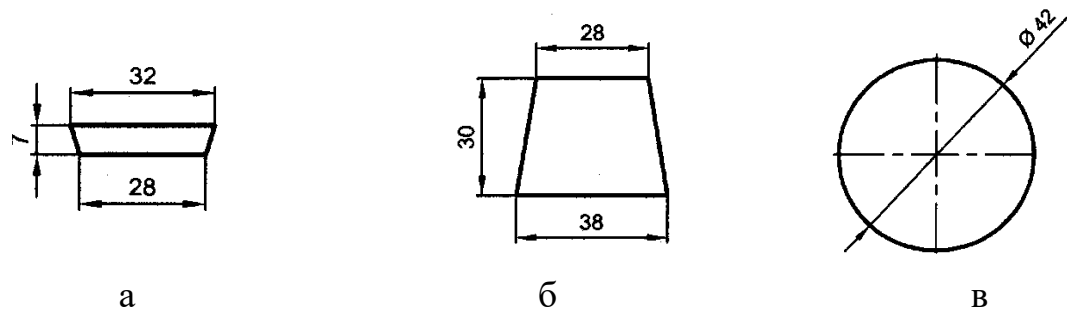
$$\Sigma F_{\text{к}} = 19,8 \text{ см}^2$$

Стояк:

$$F_{\text{ст}} = \pi r^2;$$

$$F_{\text{ст}} = 13,1 \text{ см}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{13 \cdot 1 \cdot 13,4}{4}} = 4,2 \text{ см.}$$



а – живильник; б – колектор; в – стояк

Рисунок 2.6 – Розміри елементів ливникової системи

2.4 Технологія нанесення легувального покриття на робочі поверхні форм і стрижнів

Як відзначалося раніше, для поверхневого легування можна використовувати чотири основних різновиди технологій нанесення на робочу поверхню ливарної форми або стрижня легувальних покриттів:

- з використанням паст та фарб на основі легувальних компонентів;
- засипанням в порожнину ливарної форми порошкоподібних феросплавів або чистих металів і їх лігатур;
- додаванням легувальних елементів до складу фарб, які готуються на основі вогнетривких матеріалів;
- з використанням оксидів, карбідів, нітридів, боридів та інших сполук легувальних елементів, які при певних умовах переходять в поверхневий шар виливка.

Після аналізу літератури і апробації різних методів нанесення легувальних покриттів використовували обмазки, які наносили на стрижні шпателем. Для одержання легувального покриття однакової товщини використовували металеві рамки певних розмірів і різної висоти: 3, 4, 5, 6 і 7 мм (товщини покриттів вибрані на підставі літературних джерел і попередніх власних досліджень).

Як зв'язувальний компонент при приготуванні обмазки використовували рідке скло густиною $1,3 \text{ г/см}^3$. Кількість рідкого скла змінювали залежно від фракції компонентів: чим менша фракція, тим більше витрачалося рідкого скла (від 3 до 6%).

Перед нанесенням покриття на стрижень поверхню останнього покривали протипригарною фарбою для кращого утримування легувального покриття на поверхні стрижня, особливо під час заливання форм рідким металом, та одержання якісної (без дефектів) поверхні виливка.

Стрижні з покриттям встановлювали у ливарну форму безпосередньо перед заливанням: вони мали температуру $150\ldots 200^\circ\text{C}$.

Для запобігання спливання стрижнів під дією металу їх закріплювали шпильками.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Вибрані розміри зразків для вивчення процесів поверхневого легування.
2. Відпрацьована технологія нанесення легувальних жаростійких покриттів.
3. Вибрані зв'язувальні компоненти для приготування обмазок.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХНІ

3.1 Визначення оптимального складу та фракції наповнювача покриття

Аналіз літератури щодо процесів поверхневого легування показав, що для одержання вилівка з заданими властивостями поверхні доцільно використовувати не чисті метали (особливо коли температура їх плавлення значно перевищує температуру плавлення вуглецевої сталі), а їх лігатури або феросплави.

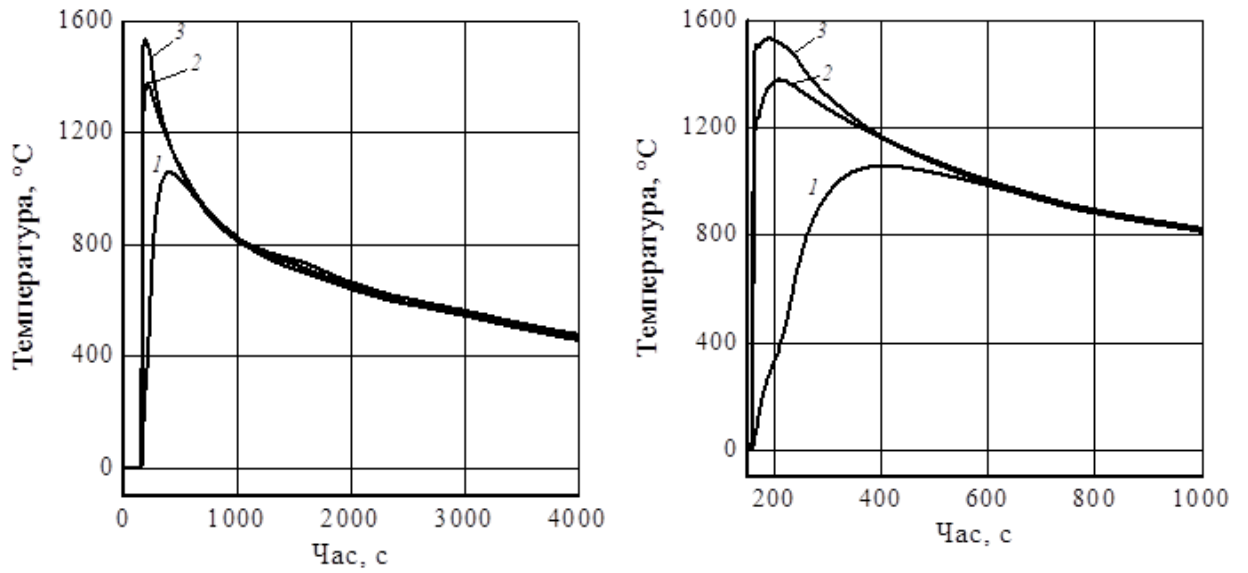
Для жаростійкого легування використовували порошкоподібний алюміній, ферохром різних марок та їх суміші в певному співвідношенні.

У досліджах використовували порошки фракцій < 02; 02; 0315; 04; 063; 1,0.

3.2 Дослідження процесів кристалізації легованого шару

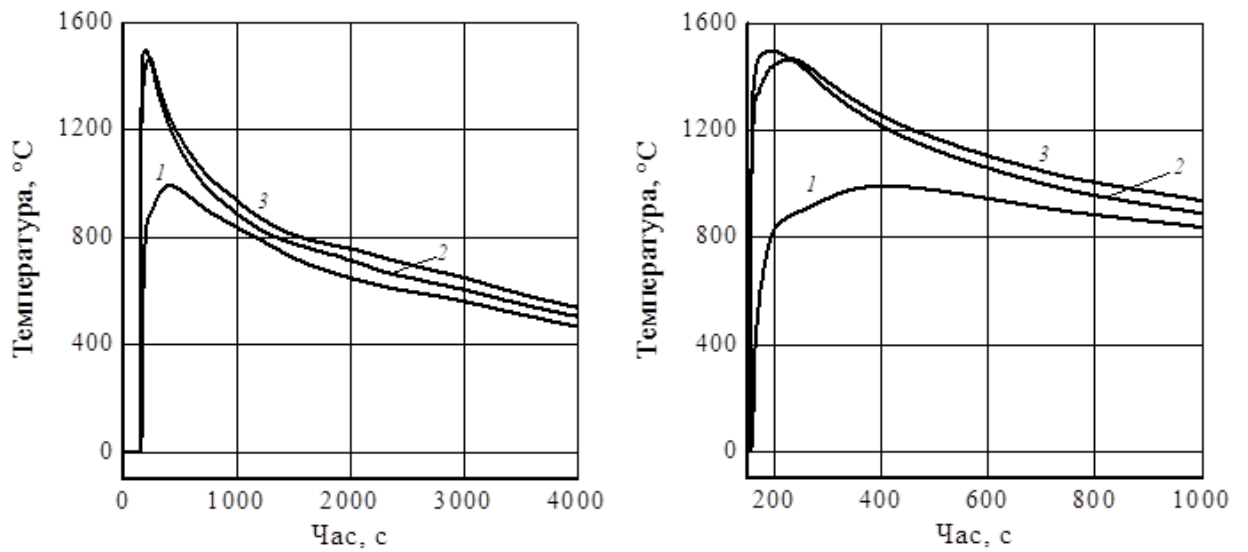
Для оцінки процесів кристалізації легованого шару записані криві охолодження легувального покриття, товщиною 5 мм. Отримані результати (рис. 3.1 та 3.2) показали, що в точці контакту «покриття - рідкий метал» температура достатня для розчинення феросплаву, з урахуванням того, що термопара знаходилась у кварцовому наконечнику (зниження температури складало 10...15 °C).

З аналізу рис. 3.1 можна зробити висновок, що під час використання ФХ800А процеси розчинення феросплаву відбудуться у повній мірі у зв'язку з низькою температурою плавлення у порівнянні із ФХ015А, з урахуванням того, що температура плавлення високовуглецевого ферохрому складає 1550 °C, а низьковуглецевого — 1630°C



1 – нижня границя покриття - стрижень; 2 – середина покриття;
3 – верхня границя покриття – рідкий метал

Рис. 3.1 – Криві охолодження при використанні FX015A



1 – нижня границя покриття - стрижень; 2 – середина покриття;
3 – верхня границя покриття – рідкий метал

Рис. 3.2 – Криві охолодження при використанні A85

3.3 Вплив фракції наповнювача на товщину легованого шару

У багатьох випадках практично неможливо нанести на поверхню форми або стрижня товстий шар легувального покриття, наприклад, шпателем, в інших випадках в цьому немає потреби, тобто достатньо нанести на поверхню за допомогою пульверизатора 1...3 мм легувального покриття, щоб одержати достатню товщину легованого шару. Вивчено вплив алюмінію та високовуглецевого хрому різних фракцій на утворення жаростійкого легованого шару. Товщина легувального покриття в усіх дослідях дорівнювала 3 мм. Результати досліджень показано на рис. 3.3.

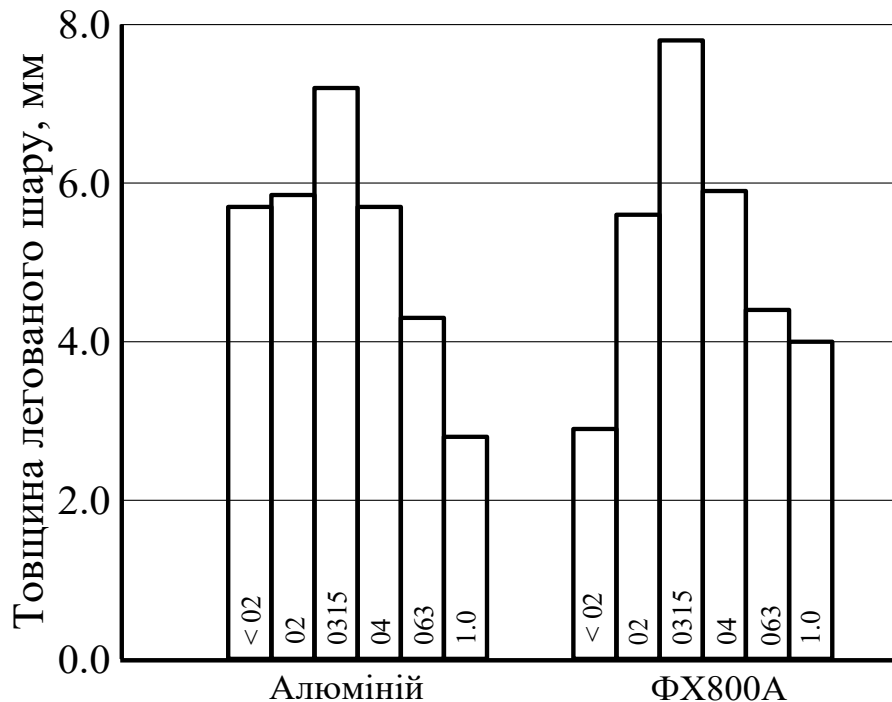


Рис. 3.3 – Зміна товщини легованого шару залежно від фракції наповнювача легувального покриття

3.4 Вплив фракції ферохрому на товщину легованого шару

Незважаючи на різні температури плавлення легувальних покриттів, кращі результати в обох випадках одержані при використанні фракції 0315, причому товщина легованого шару більша при використанні ферохрому. Очевидно це можна пояснити меншою здатністю хрому утворювати оксиди на межі розділу «легувальне покриття – розплав», що сприяє кращому безпосередньому контакту часточок ферохрому з рідким металом, внаслідок чого ці часточки розчиняються і розплавляються на більшу глибину покриття, ніж окиснений алюміній, оксиди якого перешкоджають проникненню розплаву в міжзернові канали покриття і суттєво уповільнюють дифузійні процеси на межі розділу «легувальне покриття – розплав».

Можна зробити висновок, що для жаростійкого поверхневого легування краще використовувати механічну суміш алюмінію і ферохрому, оскільки ці елементи під час експлуатації при високих температурах та в агресивних середовищах утворюють на поверхні виробу захисні плівки Cr_2O_3 , Al_2O_3 або шпінелі $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Найкращі результати отримані при використанні компонентів легуючого покриття фракції 02 та 0315 (рис. 3.4).

У першому випадку процес поверхневого легування здійснюється найбільш інтенсивно внаслідок розплавлення покриття під дією тепла залитого металу, оскільки компоненти покриття мають меншу температуру плавлення, ніж залитий метал. Компоненти покриття фракції 02 внаслідок незначних мікрооб'ємів швидко розплавляються і утворюють найбільшої товщини легований шар.

У другому випадку частинки компонентів легуючого покриття фракції 0315 мають великі розміри, тому процес утворення легованого шару здійснюється дещо по-іншому. Рідкий метал під час заливки в форму під тиском проникає в пори покриття і нагріває його до температури плавлення. Тепла металу досить для розплавлення поверхневого шару покриття, в подаль-

шому починають переважати дифузійні процеси, які протікають значно повільніше. Товщина легованого шару дещо зменшується, але залишається досить значною.

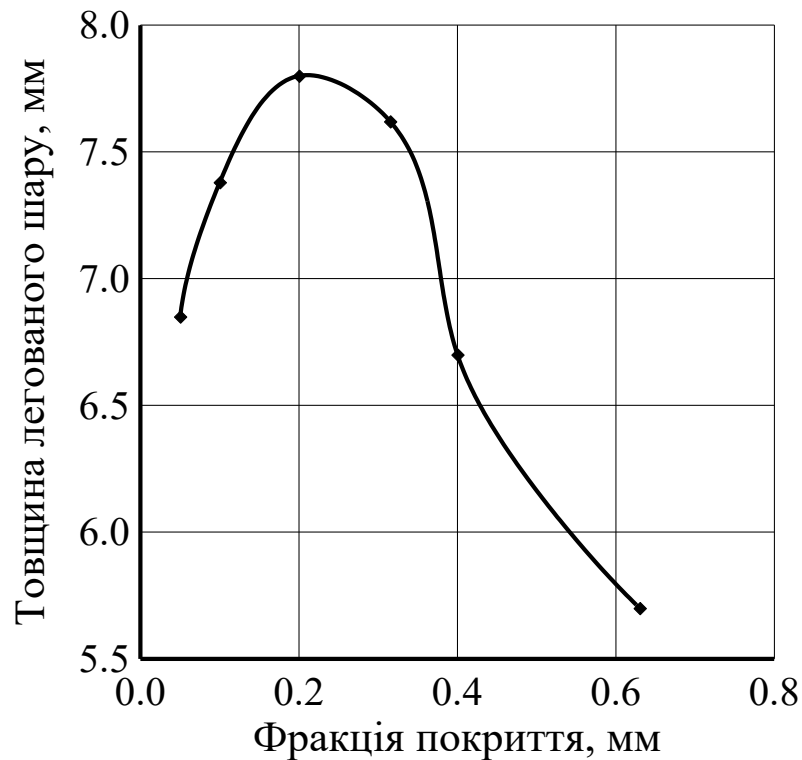


Рисунок 3.4 – Зміна товщини легованого шару залежно від фракції ферохрому

При використанні фракцій 04 і 063 процеси легування здійснюються за схемою, описаною для фракції 0315. Однак в цих випадках тепловмісту рідкого металу, при інших рівних умовах, недостатньо для повного розплавлення і розчинення компонентів. Товщина легованого шару істотно зменшується, а якість поверхні погіршується внаслідок появи шорсткості внаслідок не розплавлених повністю частинок компонентів покриття.

Загалом, процес утворення легованого шару при використанні крупнозернистих або тугоплавких компонентів легуючих покриттів можна уявити в такому вигляді. В результаті значного перегрівання заливається в форму розплаву на початку процесу кірка затверділої металу на поверхні вилівка не

утворюється, тепла основного металу досить, щоб розігріти легуючі покриття до температури, яка сприяє проникненню основного металу в пори. Такий процес легування можна порівняти з механізмом виникнення механічного пригару.

3.5 Вплив складу та фракції наповнювача на мікротвердість легованого шару

Застосування легуючих покриттів, що складаються з окремих порошків (алюмінію або ферохрому), сприяє отриманню легованого шару максимальної та однакової товщини. Мікротвердість поверхневого шару при цьому стабільна.

Зміну мікротвердості легованого шару ферохрому ФХ800А фракції 0315 показано на рис. 3.5.

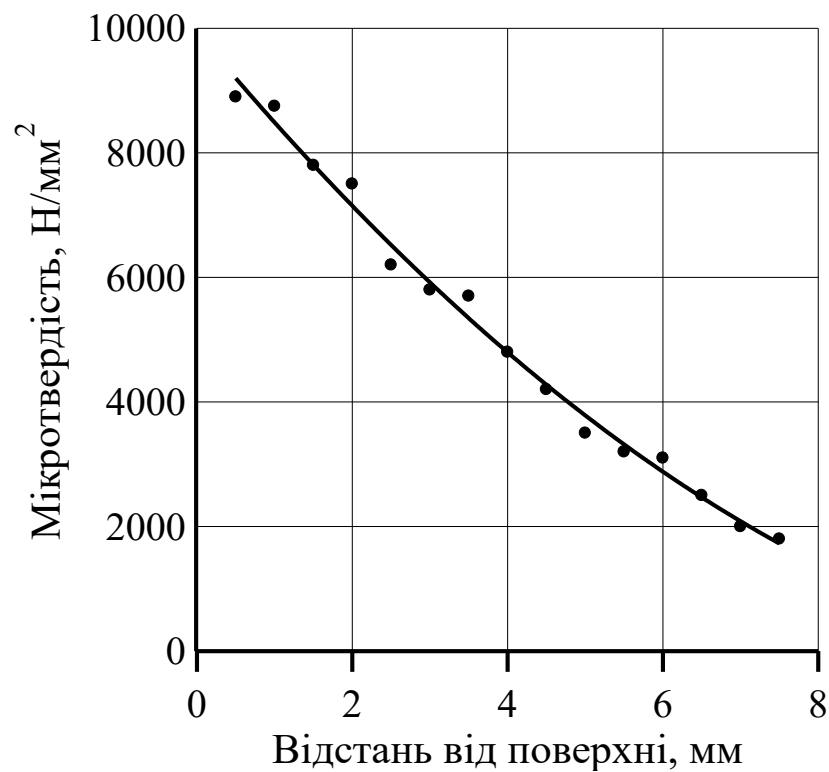


Рисунок 3.5 – Зміна мікротвердості легованого шару ферохрому ФХ800А фракції 0315

При використанні чистого порошку алюмінію температури і тепловмісту рідкої сталі досить для розплавлення легувального покриття на всю товщину, тому максимальний вміст алюмінію в фериті досягається в поверхневому шарі, про що свідчать значення мікротвердості (рис. 3.6).

Аналогічний механізм утворення легованого шару спостерігається, мабуть, і при використанні в якості основи легувального покриття ферохрому. Однак, в цьому випадку температури і тепловмісту рідкої сталі недостатньо для розплавлення покриття на всю глибину, тому і товщина легованого шару менше (рис. 3.6).

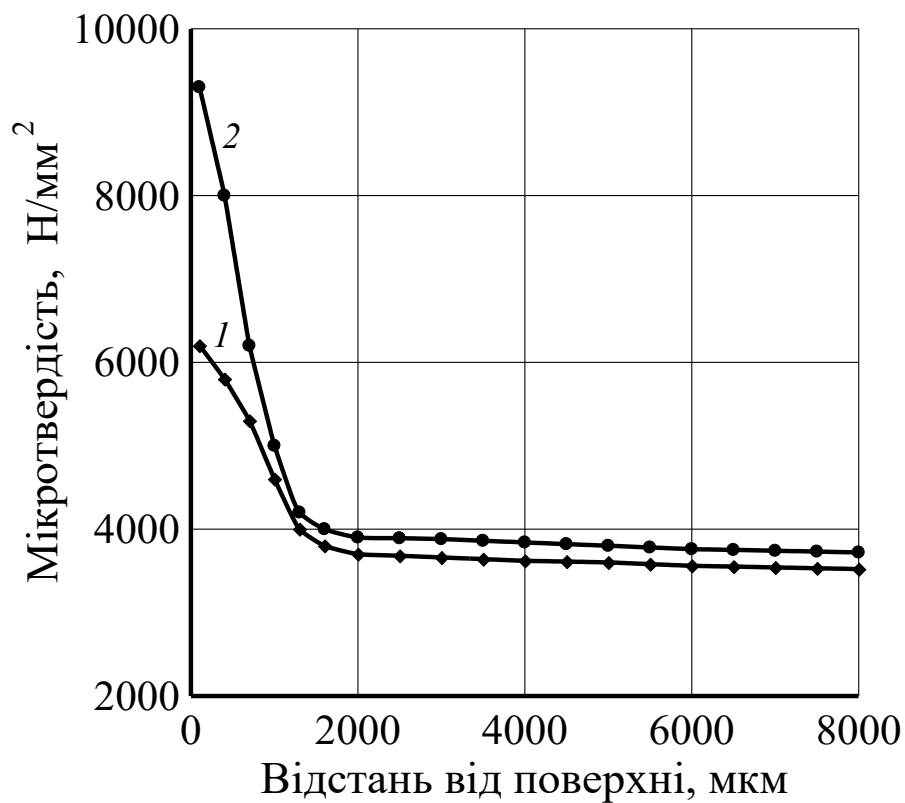


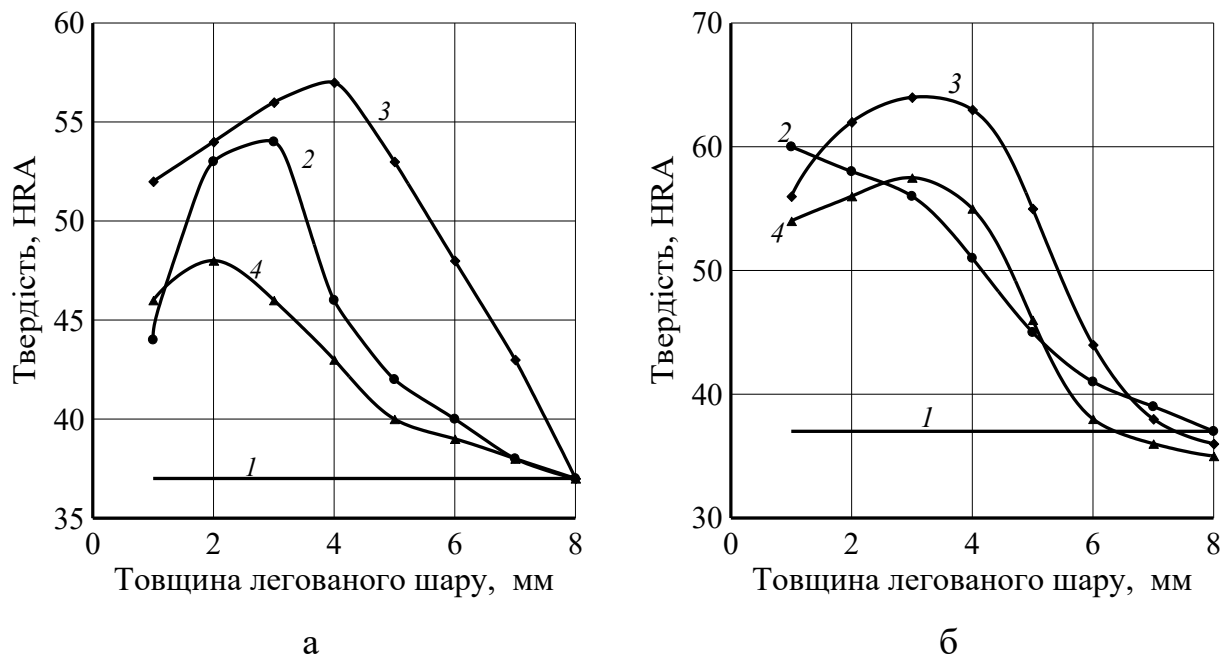
Рисунок 3.6 – Зміна мікротвердості легованого шару, отриманого при нанесенні покриття на основі порошку алюмінію (1), ферохрому (2)

Легуючі покриття при цьому розплавляється на глибину 1,5...2,0 мм, інша його частина спікається і сколюється при вибиванні виливків. Це призводить також до утворення нерівної поверхні виливка в місцях поверхневого легування.

Структура легованого шару в цьому випадку представляє собою легований хромом ферит з поступовим зменшенням концентрації хрому від зовнішньої межі легованого шару до поверхні розділу легований шар – основний метал, про що свідчить зміна мікротвердості.

3.6 Вплив наповнювача покриття на товщину легованого шару

Хром відноситься до елементів, які утворюють з залізом безперервний ряд розчинів і складні карбіди. Хром може суттєво підвищувати твердість легованого шару. Для вивчення процесів жаростійкого поверхневого легування відповідно до умов експлуатації жаростійких деталей теплових електростанцій (насадок пальників котлоагрегатів, газових пальників тощо) та з урахуванням впливу легувальних елементів на жаростійкість виробів використовували високовуглецевий ферохром, який має порівняно низьку температуру плавлення марки ФХ800А та низьковуглецевий марки ФХ015А. Для дослідження використовувались фракції 02, 0315 і 04. Показники твердості ферохрому ФХ800А виявились вищими (рис. 3.6), та з урахуванням того, що температура плавлення його нижча, можна зробити висновок, що саме високовуглецевий ферохром краще використовувати як наповнювач.



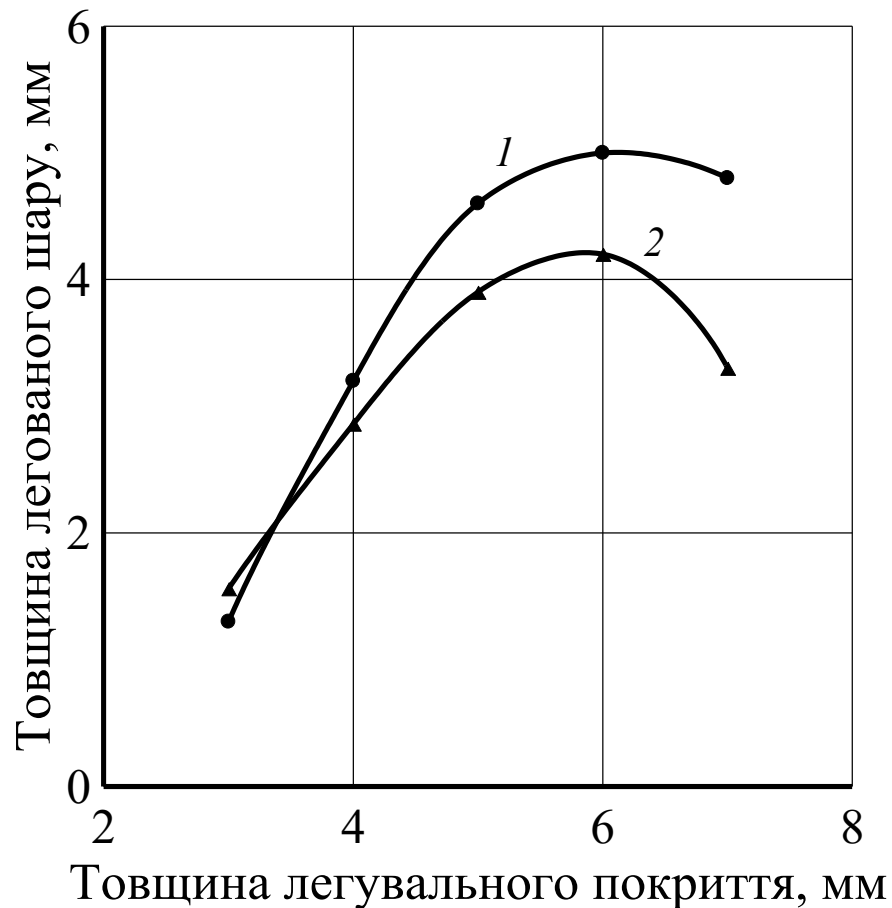
1 – твердість основи; 2 – фракція 02; 3 – фракція 0315; 4 – фракція 04

Рисунок 3.7 – Зміна товщини легованого шару залежно від наповнювача легувального покриття: ФХ015А (а) та ФХ800А (б)

3.7 Вплив товщини покриття на товщину легованого шару

Зміну товщини легованого шару залежно від товщини легувального покриття показано на рис. 3.8.

Як видно із рис. 3.8, алюміній, незважаючи на утворення оксидних плівок в процесі взаємодії основи металу, тобто розплаву, з матеріалом покриття, позитивно впливає на утворення легованого шару, товщина якого має максимальне значення при товщині покриття 6 мм. Товщина легованого шару при цьому досягає 5 мм. Проте подальше збільшення товщини легувального покриття призводить до зменшення товщини легованого шару, очевидно, внаслідок втрати з часом температури металом основи і різкого зниження теплопровідності легованого алюмінієм шару.



1 – алюміній фракції 04; 2 – ФХ800А (80%) + алюміній (20%), фракція 04

Рисунок 3.8 – Зміна товщини легованого шару залежно від товщини легувального покриття

Такий же характер зміни товщини легувального шару від товщини легувального покриття має і механічну суміш ферохрому і алюмінію. Незважаючи на підвищення температури плавлення легувального покриття, товщина легованого шару перевищує 4 мм, що повною мірою задовольняє вимогам, які пред'являються до жаростійких литих деталей. Наприклад, насадки пальників котлоагрегатів ТЕС за 52000 год експлуатації при температурі 1200 °С набувають глибину корозії 2,0...2,5 мм.

Оскільки в досліджах використовували порошки фракції 04, то можна зробити припущення, що в цьому випадку поверхневе легування здійснюва-

лось як внаслідок часткового розплавлення (ФХ800А) компонентів покриття, так як внаслідок капілярного проникнення рідкого металу в пори покриття.

Отже для досягнення максимальної товщини легованого шару необхідно використовувати легувальне покриття на основі алюмінію або механічної суміші ферохрому і алюмінію в певних співвідношеннях товщиною 5...7 мм, яке можна наносити на поверхні ливарних форм або стрижнів у вигляді обмазок.

У багатьох випадках практично неможливо нанести на поверхню форми або стрижня товстий шар легувального покриття, наприклад, шпателем, в інших випадках в цьому немає потреби, тобто достатньо нанести на поверхню за допомогою пульверизатора 1...3 мм легувального покриття, щоб одержати достатню товщину легованого шару.

3.8 Вплив зв'язувальних компонентів

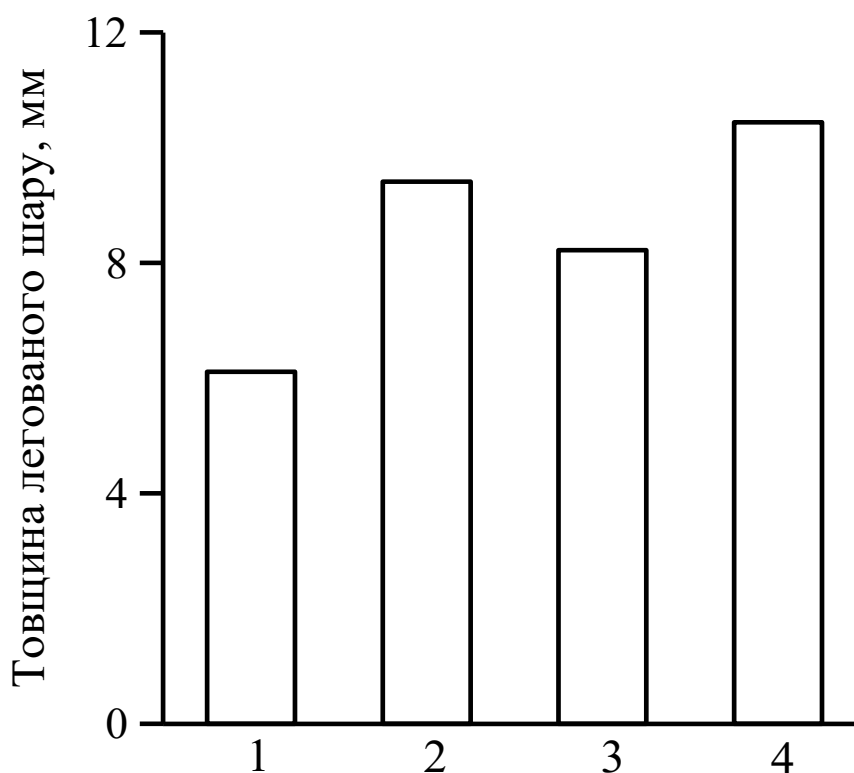
3.8.1 Вплив зв'язувальних компонентів на товщину та мікротвердість легованого шару

Досліджено вплив застосовуваних як зв'язувальні компоненти при виготовленні легуючого покриття рідкого скла ($M = 2,5$, щільність $1,3 \text{ г / см}^3$) і технічного лігносульфонату (ЛСТ) на товщину (рис. 3.9) і мікротвердість (рис. 3.10) легованого шару. Встановлено, що застосування рідкого скла як сполучного компонента для легуючих покриттів недоцільно, оскільки товщина легованого шару при інших рівних умовах найменша. Крім того, продукти термодеструкції рідкого скла надають легованому шару досить шорстку поверхню, а виникнення склоподібних оболонок навколо частинок легованого покриття зменшує ступінь їх розплавлення під дією розплаву. Це дуже важливо для виробничих умов, де використовувати високу температуру заливання важко.

При застосуванні як зв'язувальний компонент ЛСТ важливу роль відіграє процес газоутворення. Газу, що утворюються можуть створювати на межі поділу «легуюче покриття-рідкий метал» протитиск і перешкоджати проникненню металу в пори покриття. Тому для зменшення газоутворення ЛСТ, який дає найкращі результати, слід розбавляти водою, в співвідношенні 1:1.

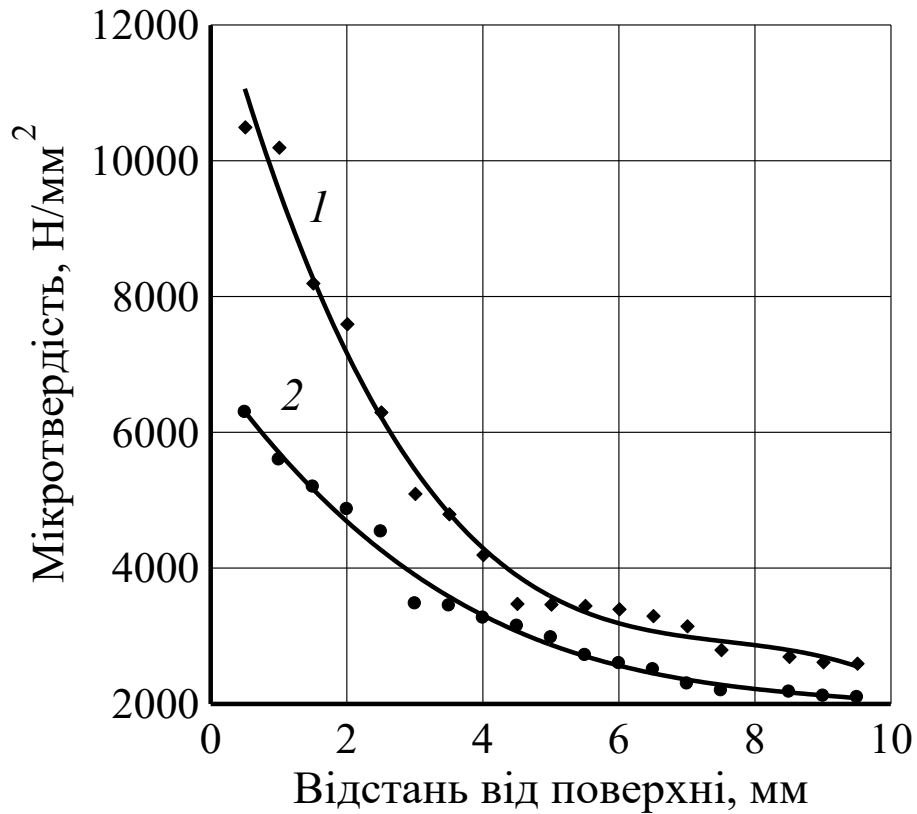
Тобто, для поліпшення змочуваності компонентів легувального покриття і зменшення шкідливого впливу на якість металу додатково ЛСТ розводили водою у співвідношенні 1:1, а рідке скло розбавляли до щільності $1,0 \text{ г / см}^3$.

Таким чином, для отримання якісного легованого шару максимальної товщини як зв'язувальні компоненти легуючого покриття необхідно використовувати розведений технічний лігносульфонат або розбавлене рідке скло.



1 – рідке скло; 2 – ЛСТ; 3 – розбавлене рідке скло; 4 – розбавлений ЛСТ

Рисунок 3.9 – Зміна товщини легованого шару залежно від типу зв'язувального компоненту для ФХ800А



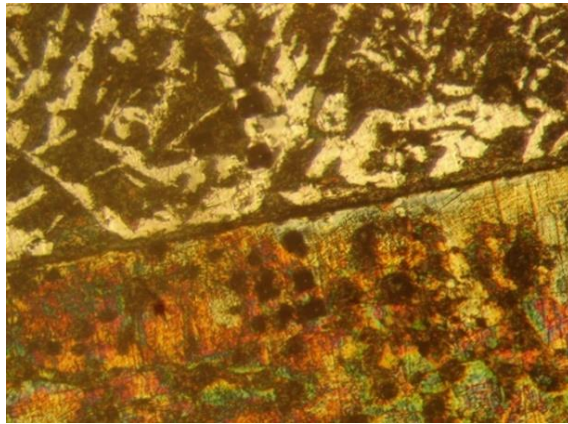
1 – розбавлене рідке скло; 2 – розбавлений ЛСТ

Рисунок 3.10 – Зміна мікротвердості легованого шару ФХ800А по товщині залежно від типу зв'язувального компоненту

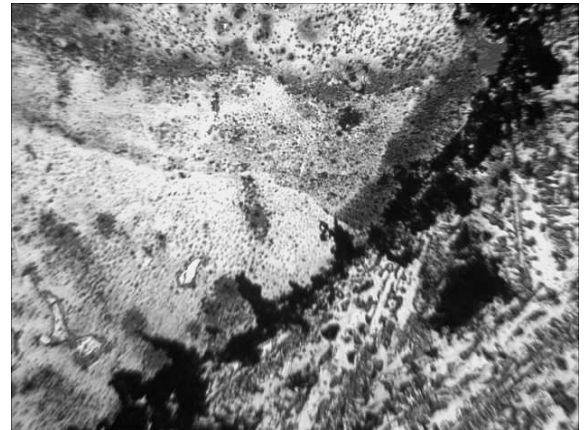
3.8.2 Вплив зв'язувальних компонентів на якість легованого шару

Результати, отримані при використанні розбавленого ЛСТ були дещо кращі, ніж при використанні розбавленого рідкого скла. Однак з урахуванням якості перехідного шару така рекомендація вимагає уточнення. Аналізом мікроструктур (рис. 3.11) встановлено, що сполучний компонент істотно впливає на процеси утворення перехідного шару. При використанні рідкого скла щільністю утворюється якісний, чистий від раковин і пір шар, який має високу міцність. При використанні розведеного технічного ЛСТ, що має високу газотвірну здатність, перехідний шар забруднюється продуктами термодеструкції (утворюються газові раковини і пори) і неметалевими вкраплинами.

Отже, як зв'язувальний компонент при поверхневому легуванні доцільніше використовувати розбавлене рідке скло щільністю $1,0 \text{ г / см}^3$.



а



б

Рисунок 3.11 – Фрагменти мікроструктур поверхневих шарів литих заготовок після використання рідкого скла (а) і ЛСТ (б) $\times 400$

3.8.3 Вплив зв'язувальних компонентів на розподіл неметалевих вкраплин

Вивчено розподіл неметалевих вкраплин в легованому шарі і основі металу (рис. 3.12) при використанні розбавлених рідкого скла та ЛСТ. За результатами дослідження можна зробити висновок, що ЛСТ має найбільшу газотвірну здатність і призводить до забруднення легованого шару неметалевими вкраплинами.

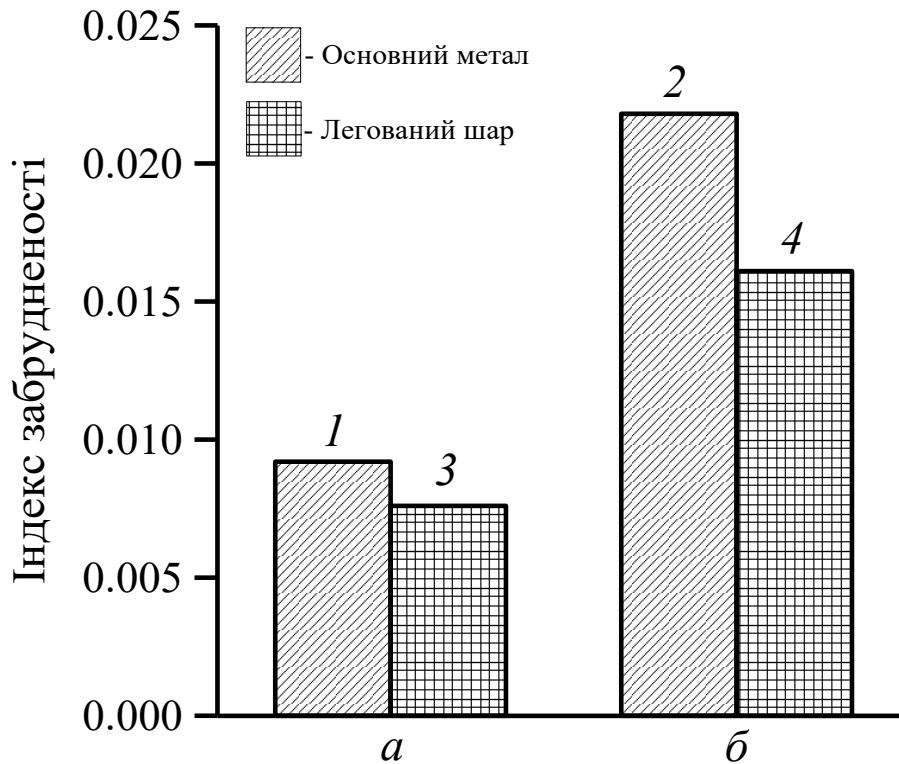


Рисунок 3.12 - Впливу рідкого скла + вода (а) і ЛСТ + вода (б) на забрудненість основи металу (1, 2) і легованого шару (3, 4)

3.9 Визначення оптимального складу легувальних покриттів

Окремо досліджено зміну товщини легувального покриття залежно від вмісту феросплавів та фракції наповнювача (рис. 3.13 і 3.14).

У процесі математичного оброблення результатів дослідження (табл. 3.1) отримано рівняння для розрахунку прогнозованої товщини легувального покриття залежно від вмісту Cr та Al:

$$z(x,y) = 0.367646 + 0.0188684y + 3.88203e-005y^2 + 0.0729229x + -0.000656189xy$$

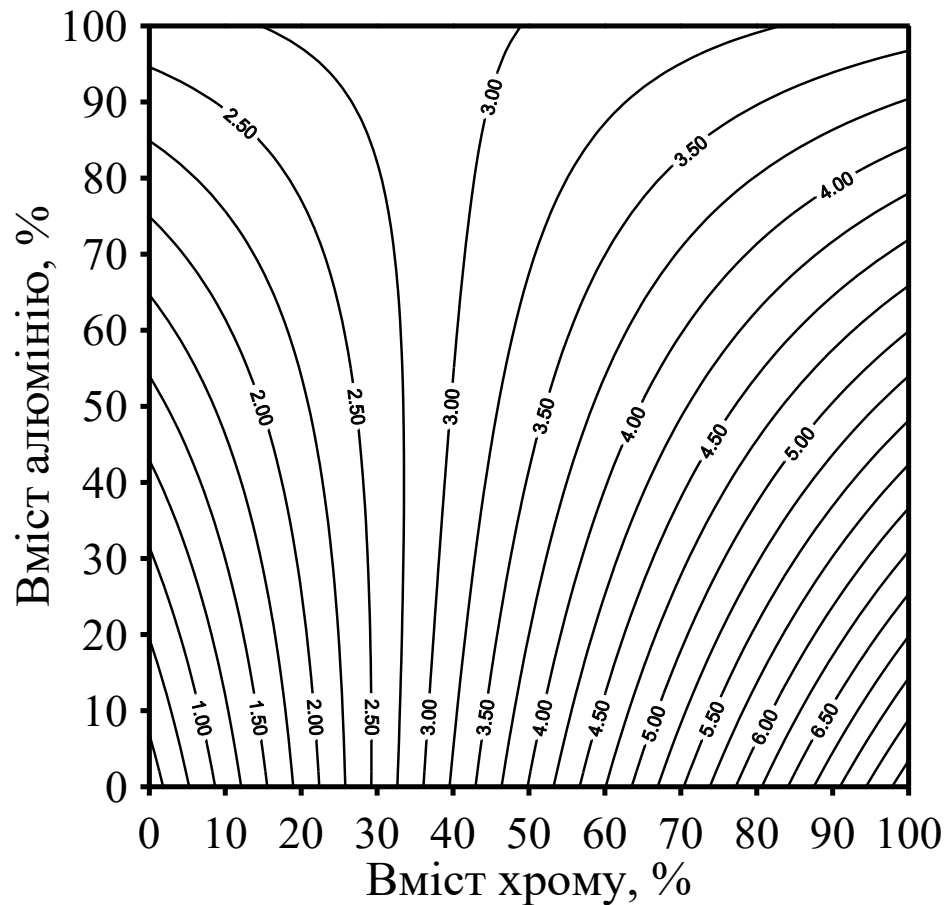


Рисунок 3.13 – Номограма визначення товщини легувального покриття залежно від вмісту феросплавів

У процесі математичного оброблення результатів дослідження отримано рівняння для розрахунку прогнозованої товщини легувального покриття залежно від фракції наповнювача:

$$z(x,y) = 12.2378 + -2.65692y + -4.92631y^2 + -13.4763x + 6.79607xy + 3.44442x^2$$

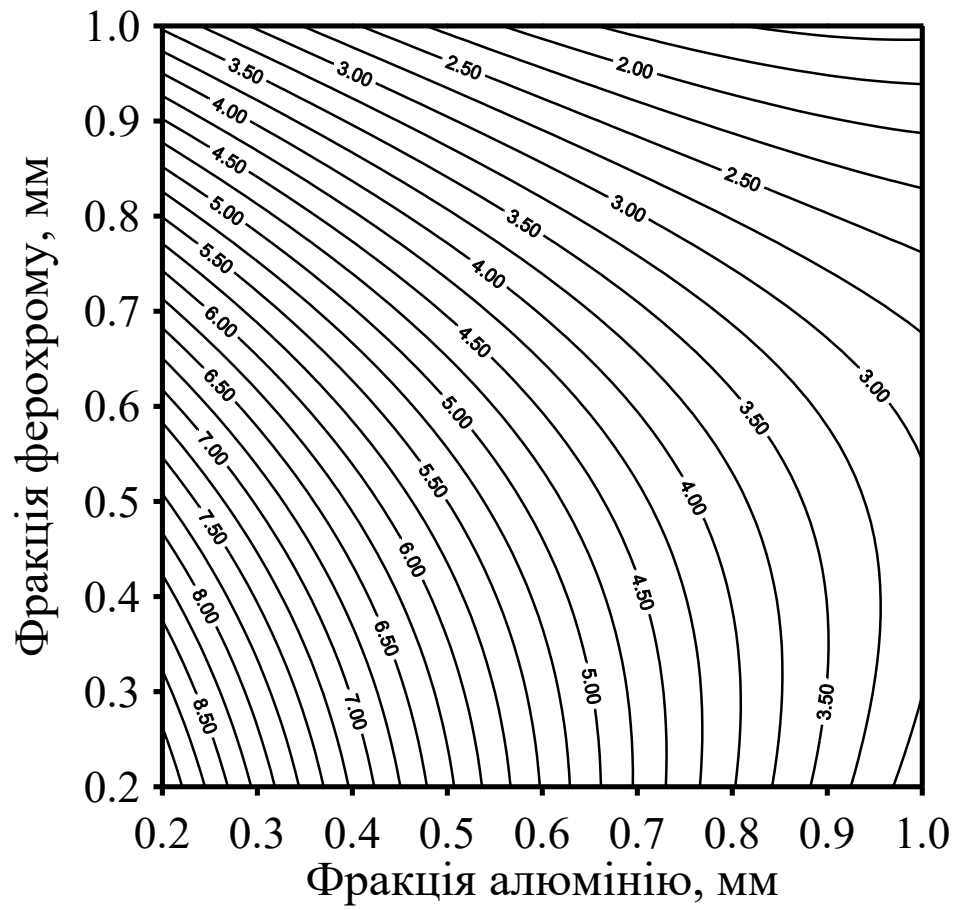


Рисунок 3.14 – Номограма визначення товщини легувального покриття залежно від фракції наповнювача

Таблиця 3.1 – Результати дослідження зміни товщини легувального покриття залежно від вмісту Cr та Al

Вміст Cr	Вміст Al	Товщина легувального покриття
5,0	1,0	12,5
5,0	2,0	10,4
5,0	3,0	8,1
5,0	4,0	5,7
5,0	5,0	2,5
7,5	1,0	10,7
7,5	2,0	8,9
7,5	3,0	7,1
7,5	4,0	4,6
7,5	5,0	2,1
10,0	1,0	8,7
10,0	2,0	6,9
10,0	3,0	5,4
10,0	4,0	3,1
10,0	5,0	1,8
12,5	1,0	7,5
12,5	2,0	6,1
12,5	3,0	5,5
12,5	4,0	3,4
12,5	5,0	1,5
15,0	1,0	5,4
15,0	2,0	4,5
15,0	3,0	3,7
15,0	4,0	2,5
15,0	5,0	1,2

3.10 Дослідження окалинотійкості легованого шару

Дослідження окалинотійкості легованого шару проводилося в середовищі повітря протягом 10 і 100 год. Результати випробувань наведено в табл. 3.2 і на рис. 3.15. Випробування проводилися при температурі 1000 °С.

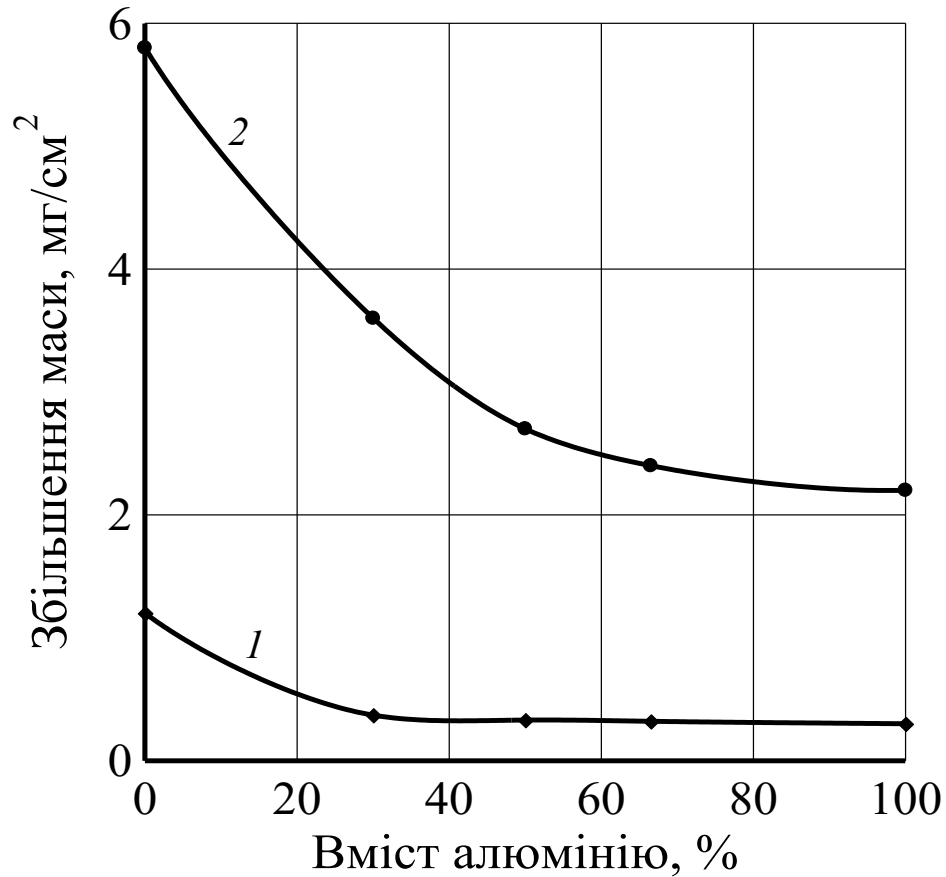
Як видно з табл. 3.2, окалинотійкість легованого шару на порядок вище окалинотійкості вуглецевої сталі. Це підтверджує можливість і доцільність процесу поверхневого легування.

Таблиця 3.2 – Окалинотійкість легованого шару

Індекс покриття	Склад легувального покриття, % по об'єму		Збільшення маси, мг/см ² , при витримці, год	
	Алюмінієвий порошок	ФХ800А	10	100
0	—	—	6,50	56,00
1	—	100	1,20	5,80
2	30	70	0,37	3,60
3	50	50	0,33	2,70
4	66,5	35,5	0,32	2,40
5	100	—	0,30	2,20

Кращими захисними властивостями володіє легований шар, отриманий при нанесенні легувального покриття на основі ферохрому, так як утворена на поверхні зразка при високих температурах окисна плівка Cr_2O_3 є більш щільною і важче відшаровується від поверхні. Добавки алюмінію викликають утворення комплексної плівки, до складу якої входять оксиди Al_2O_3 , що володіють меншою здатністю до утримування поверхні зразка і можуть періодично відшаровуватися від поверхні, даючи можливість утворюватися новим оксидам алюмінію.

Таким чином, легований шар, отриманий при нанесенні легувального покриття на основі хрому, має досить високу окислостійкість, але має обмежену товщину. Виливки з таким легованим шаром можуть використовуватися для роботи при температурах до 1000 °С.



1 – витримка протягом 10 годин, 2 – витримка протягом 100 годин

Рисунок 3.15 – Зміна окислостійкості легованого шару в залежності від вмісту алюмінію в легувальному покритті при 1000 °С.

Легувальне покриття на основі порошку алюмінію забезпечує отримання легованого шару достатньої товщини з рівномірним розподілом легувального елемента, однак окислостійкість такого шару нижче, хоча і залишається високою. Тому виливки з таким легованим шаром можуть довго працювати лише при температурах до 900 °С.

Легувальне покриття на основі хрому та алюмінію не забезпечує отримання легованого шару достатньої для експлуатації та високих температурах товщини з рівномірним розподілом в ньому легуючих елементів.

Отже, необхідні дослідження щодо впливу на товщину поверхневого легованого шару інших співвідношень хрому і алюмінію, інших складів покриттів, фракцій вихідних матеріалів, особливого нанесення і товщини легуючих покриттів, температурних режимів заливки і охолодження.

Як зазначалося вище, механічні суміші порошків алюмінію ферохрому не дозволяють отримати легований шар достатньої товщини з рівномірно розподіленими елементами.

Досліджено вплив легувального покриття на основі лігатури хром-алюміній-залізо складу 66% хрому, 15% алюмінію, 1% кремнію, інше залізо на процес утворення легованого шару.

Вибір гранулометричного складу лігатури фракцій 01 і 0315 у співвідношенні 1:1 обумовлений прагненням отримати легувальне покриття, що має, з одного боку, розмір пір, достатній для вільного проникнення в них рідкого металу, а з іншого боку, розміри частинок порошку, що забезпечують їх ефективне розплавлення.

Після заливки форм з температури 1560 °C отримано легований шар із середньою товщиною 260 мкм. Розподіл легуючих елементів в легованому шарі рівномірне, про що свідчить мікротвердість шару на різних відстанях від межі поділу легований шар – основний метал. Структура легованого шару являє собою легований хромом і алюмінієм ферит з поступовим зменшенням вмісту легуючих елементів до межі поділу.

Однак товщина легуючого шару недостатня через низьку для цього легувального покриття температури заливки. Дослідження окалинотійкості легованого шару (табл. 3.3) показали досить високу окалинотійкість зразків.

Окалинотійкість легованого шару знаходиться на рівні хромоалюмінієвих сталей.

Таблиця 3.3 – Окалиностійкість легованого шару, отриманого при нанесенні покриття на основі лігатури хром-алюміній-залізо

Температура випробувань, °C	Збільшення маси, мг/см ² при витримці, год	
	10	100
1200	0,72	2,3
1000	0,25	1,1
900	0,12	0,7

Таким чином, застосування легуючих покриттів на основі лігатури хром-алюміній-залізо є перспективним для отримання легованого шару, що володіє високою окалиностійкістю, але вимагає більш високої температури перегріву металу перед заливкою у форми. Такий метод може бути використаний для отримання легованого шару на виливках, виготовлених із сталей, що містять знижену кількість хрому (18 ... 20%).

3.11 Висновки до розділу 3

На підставі аналізу науково-технічної літератури можна зробити такі висновки:

1. Найбільш жаростійкими матеріалами є сплави на основі заліза (чавуни та сталі), леговані хромом, алюмінієм тощо.
2. Високих експлуатаційних характеристик цих сплавів можна досягти не об'ємним, а поверхневим легуванням металу в окремих робочих частинах литої деталі безпосередньо у ливарній формі.
3. Наповнювачами легувальних покриттів можуть бути використані чисті метали, феросплави, лігатури або механічні суміші на їх основі: для одержання жаростійких виробів – хром, ферохроми різних марок, алюміній тощо.

4. Процеси поверхневого легування, рецептури легувальних покриттів та технологія нанесення цих покриттів на поверхні форм і стрижнів вивчені мало і потребують глибокого дослідження.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО – ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження

Актуальність роботи полягає в тому, що прискорений розвиток техніки вимагає розробки матеріалів з покращеними характеристиками. Підвищуються температурні умови експлуатації виробів, зростають питомі навантаження та агресивність робочого середовища.

Аналіз експлуатації великої кількості литих деталей машин і механізмів, які працюють в умовах високих температур і агресивних середовищ (теплоенергетика, металургія, гірничозбагачувальна і хімічна галузі тощо), показує, що технології їх виготовлення з використанням об'ємного легування не завжди себе виправдовують, а у багатьох випадках і шкідливі, оскільки лише невелика товщина таких деталей зношується, окиснюється або ушкоджується. Це призводить до невиправданих витрат дорогих високолегованих сплавів. Наприклад, аналіз показників витрати металу на одиницю виробленої електроенергії тепловими електростанціями України показує: щорічно безповоротно втрачаються тисячі тонн металу литих деталей високої собівартості. У цих випадках достатньо було б забезпечити високі експлуатаційні характеристики тільки робочих поверхонь таких деталей. Для реалізації цієї проблеми перспективними можуть бути способи виробництва жаростійких виливків із нелегованих сплавів на основі заліза з поверхневим легуванням шаром, який утворюється під час формування виливка в ливарній формі.

Для досягнення високої жаростійкості литих деталей в машинобудуванні використовують різні види оброблення, застосовують покриття і наплавлення на поверхні виробів металу із спеціальними властивостями. Проте багатьма з цих методів не вдається одержати шар з потрібними властивостями завтовшки більше 0,3 мм, що недостатньо, особливо для тривалої експлуатації крупних деталей. Практика показує, що товщина поверхневого шару із спеціальними властивостями повинна бути не менше 5...10 мм. Наплавлен-

ням на поверхні деталі можна одержати шар такої товщини, але цей процес дуже трудомісткий, дорогий і, крім того, на деяких поверхнях деталей наплавлення металу здійснити практично неможливо.

Одним з резервів економії дорогих легуючих елементів з одночасним підвищенням експлуатаційних властивостей литих заготовок є утворення на їх поверхні шару металу, який мав би раніше запрограмовані структуру і службові властивості. Формування такого робочого шару здійснюють методами поверхневого легування з використанням різних обмазок або армуванням поверхні вилівка вставками з матеріалу, що має високі експлуатаційні властивості.

Мета і завдання магістерської дисертації

Мета роботи – розроблення теоретичних і технологічних основ виготовлення жаростійких виливків з вимоговими властивостями в окремих їх частинах на основі використання поверхневого легування з подальшою реалізацією розроблених технологій у промисловості.

У дисертації поставлені такі задачі:

1. Літературний огляд фахових публікацій за темою дисертації;
2. Дослідження процесів поверхневого легування;
3. Розробка методики проведення дослідження;
4. Вивчення основних технологічних факторів виготовлення виливків з легованою поверхнею,
5. Вибір матеріалів для жаростійкого поверхневого легування;
6. Розроблення технологій виготовлення виливків з диференційованими властивостями;
7. Дослідження структури та властивостей легового шару;
8. Дослідження процесів окиснення поверхневого шару.
9. Узагальнення отриманих даних і лабораторних випробувань

4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження

Робота виконувалася на кафедрі ливарного виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського. Планова собівартість магістерської дисертації розраховувалась по наступних статтях витрат:

- заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість матеріалів, необхідних для виконання магістерської дисертації;
- вартість спеціального обладнання для проведення експерименту;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати.

4.2.1 Витрати на оплату праці

Розрахунок заробітної плати науково-дослідницького персоналу базується на визначенні трудомісткості робіт окремих виконавців та їх денної заробітної плати (враховуючи кількість виконавців, їх кваліфікацію і завантаженість роботою на різних етапах магістерської дисертації).

У виконанні наших дослідів приймали участь виконавці: провідний науковий співробітник, молодший науковий співробітник, інженер-дослідник та технік. Для кафедри ливарного виробництва чорних та кольорових металів технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» місячні посадові оклади заробітної плати складають:

- старшого наукового співробітника – 10572 грн.;
- молодшого наукового співробітника – 9832 грн.;
- техніка – 4063 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на середню кількість днів у місяці, що при п'яти-

денному робочому тижні становить 21,2. Таким чином, величина денної заробітної плати виконавців складає для:

- старшого наукового співробітника – 498, 68 грн.;
- молодшого наукового співробітника – 463,77 грн.;
- техніка – 191,65 грн.

Результати експертної оцінки трудомісткості етапів магістерської дисертації наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість макроетапів виконання МД

Макроетапи роботи	Трудомісткість, людино-дні			
	Старший науковий співробітник	Молодший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Технік
1	2	3	4	5
Аналіз фахових публікацій з теми	2	8	12	-
Розробка методик	5	5	5	-
Підготовка до проведення експерименту	-	3	18	5
Підготовка зразків до дослідження	-	-	16	5
Дослідження зразків	-	3	20	-
Обговорення результатів	7	4	16	-
Всього	14	23	87	10

У випадку відсутності відповідних розрахункових методик трудомісткість різних етапів виконання магістерської дисертації встановлюється на ба-

зі експертних оцінок, які дають провідні фахівці. При цьому робота розглядається як сукупність макроетапів, аналіз кожної окремої операції не проводиться.

Величина фонду заробітної платні ($\Phi_{зп}$) визначається як добуток трудомісткості на денну заробітну платню виконавця:

$$\Phi_{зп} = 14 \cdot 498,68 + 23 \cdot 463,77 + 87 \cdot 0 + 10 \cdot 191,65 = 19564,73 \text{ грн.}$$

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок складає 22,0% від заробітної плати.

$$\epsilon_{св} = 0,22 \cdot \Phi_{зп}, \quad (4.1)$$

де $\Phi_{зп}$ - фонд заробітної платні.

Підставивши дані у формулу (4.1), отримаємо:

$$\epsilon_{св} = 0,22 \cdot 19564,73 = 4304,24 \text{ грн.}$$

4.2.3 Витрати на спеціальне обладнання

При виконанні магістерської дисертації усі роботи проводилися з використанням лише наявного обладнання на кафедрі ливарного виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського. Дане обладнання використовується для виконання інших магістерської дисертації, тому витрати на придбання, утримання та експлуатацію обладнання відносяться до статті «накладні витрати».

4.2.4 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Для виготовлення експериментальних зразків були необхідні наступні матеріали: сталевий брухт, ферохром марок ФХ015А, ФХ025А, ФХ650А, ФХ800А, А85. Дані про вартість перелічених матеріалів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Вартість основних матеріалів

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця вимірювання	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн	Сума, грн
1	2	3	4	5	6
Сталевий брухт	ГОСТ 2787-75	кг	25,0	6,8	170,0
ФХ015А	ГОСТ 4757-91	кг	1,5	125	187,5
ФХ025А	ГОСТ 4757-91	кг	1,0	110	110,0
ФХ650А	ГОСТ 4757-91	кг	1,0	135	135,0
ФХ800А	ГОСТ 4757-91	кг	1,6	125	200,0
А85	ГОСТ 11069-2001	кг	2,8	115	322,0
Всього					1114,5

4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій

У виконанні даної магістерської дисертації сторонні організації участі не приймали.

4.2.6 Витрати на службові відрядження

Усі роботи, пов'язані з виконанням магістерської дисертації за даною темою, проведені на кафедрі ливарного виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського. Окремі службові відрядження не планувались.

4.2.7 Інші прямі невраховані витрати

Інші прямі невраховані витрати ($C_{\text{інш}}$) плануються у розмірі 10% від врахованих.

$$C_{\text{інш}} = 0,1 \cdot (\Phi_{\text{зп}} + \epsilon_{\text{св}} + C_{\text{м}}), \quad (4.2)$$

де $\Phi_{\text{зп}}$ – фонд заробітної плати;

$\epsilon_{\text{св}}$ – єдиний соціальний внесок;

$C_{\text{м}}$ – повна сума витрат на матеріали.

$$C_{\text{інш}} = 0,1 \cdot (19564,73 + 4304,24 + 1114,5) = 2498,35 \text{ грн.}$$

4.2.8 Накладні витрати

До накладних витрат (НВ) відносяться витрати на заробітну плату адміністративно-управлінського, господарчого та допоміжного персоналу (разом з єдиним соціальним внеском), витрати на допоміжні виробництва, видатки на охорону праці, техніку безпеки та екологію, фінансування підготовки кадрів, воєнізованої охорони і деякі інші.

Норматив відрахувань на накладні витрати на кафедрі ливарного виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського встановлений в розмірі 20% планової суми прямих витрат по темі магістерської дисертації.

Розраховуємо величину накладних витрат наступним чином:

$$НВ = (C_m + \Phi_{зп} + \epsilon_{св} + C_{інш}) \cdot 0,2, \quad (4.3)$$

де C_m – вартість матеріалів, необхідних для виконання теми;

$\Phi_{зп}$ – фонд заробітної плати;

$\epsilon_{св}$ – єдиний соціальний внесок;

$C_{інш}$ – інші витрати.

$$НВ = 0,2 \cdot (19564,73 + 4304,24 + 1114,5 + 2498,35) = 5496,36 \text{ грн.}$$

4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова кошторисна вартість дослідів визначається як сума витрат за окремими статтями вартості. Результати визначення вартості наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Калькуляція планової кошторисної вартості дослідів

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1.Витрати на оплату праці	19564,73	Відповідно до розрахунків
2.Єдиний соціальний внесок	4304,24	Відповідно до діючих загальнодержавних нормативів
3.Матеріали для проведення досліджень	1114,5	Відповідно до розрахунків
4.Енергоносії для проведення досліджень	-	Відповідно до розрахунків
5.Спецобладнання для наукових цілей	-	Відповідно до розрахунків

Продовження таблиці 4.3

1	2	3
6.Вартість послуг сторонніх організацій	-	За договором із сторонніми організаціями
7.Витрати на службові відрядження	-	Відповідно до розрахунків
8.Інші невраховані прямі витрати по темі	2498,35	10% від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	5496,36	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми
10.Усього витрат по темі	32978,18	Сума попередніх статей
11.Кошторисна вартість теми	32978,18	Сума попередніх статей

Згідно з таблицею 4.3 загальна планова кошторисна вартість магістерської дисертації складас: 32978,18 грн.

4.3 Економічна ефективність роботи

Дана робота являє собою частину комплексної теми, у зв'язку з цим розрахунок прямої ефективності її результатів не виконується. У цьому випадку можна застосувати оцінку умовної ефективності по окремих її характеристиках:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність розробки (K_4).

Шкала для оцінки важливості розробки K_1 :

1. Ініціативна робота, яка не є ані частиною комплексної програми, ані завданням директивних органів: 1;

- 2. Робота, яка виконується за договором про науково-технічні допомоги: 3;
- 3. Робота представляє собою частину відомчої програми: 5;
- 4. Робота представляє собою частину відомчої комплексної програми: 7;
- 5. Робота виконується як частина міжнародної комплексної програми: 8.

Приймаємо показник важливості розробки $K_1 = 5$.

Шкала для оцінки можливості використання результатів розробки K_2 :

- 1. Результати розробок можуть бути використані в даному підрозділі: 1;
- 2. Результати розробки можуть бути використані в даній організації: 3;
- 3. Результати розробки можуть бути використані в багатьох організаціях: 5;
- 4. Результати розробки можуть бути використані в масштабах галузі: 8;
- 5. Результати розробки можуть бути використані в багатьох різноманітних галузях: 10.

Приймаємо показник $K_2 = 8$.

Шкала для оцінки теоретичної значимості і рівня нововведення K_3 :

- 1. Аналіз узагальнення і класифікація відомої інформації, подібні результати були відомі в досліджуваній області: 2;
- 2. Одержання нової інформації, що доповнить подання про суттєвість досліджуваних процесів, не відомої в дослідницькій області: 3;
- 3. Одержання нової інформації, яка частково міняє уявлення про суттєвість дослідження процесів, не відомих раніше: 5;
- 4. Створення нових теорій, методик і т. п. : 6;
- 5. Одержання інформації, яка служить формуванню нових напрямків: 8.

Приймаємо показник $K_3 = 3$.

Шкала для оцінки показників складності дослідження K_4 :

1. Робота виконується одним підрозділом, витрати менше 20 тис. грн.: 1;
2. Робота виконується одним підрозділом, витрати 20...100 тис. грн.: 3;
3. Робота виконується одним підрозділом, витрати 100...200 тис. грн.: 5;
4. Робота виконується з урахуванням багатьох підрозділів, витрати від 200 тис. грн. до 1 млн. грн.: 7;
5. Робота виконується декількома організаціями, витрати понад 1 млн. грн.: 9.

Приймаємо показник $K_4 = 3$.

Загальна оцінка економічного ефекту (E_3^y) вираховується перемноженням коефіцієнтів. Умовний ефект на кожен бал становить 200 грн:

$$E_3^y = 200 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (4.4)$$

де K_1 – важливість розробки;

K_2 – можливість використання результатів розробки;

K_3 – теоретичне значення та рівень новизни;

K_4 – складність розробки.

$$E_3^y = 200 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 3 = 72000 \text{ грн}$$

Умовний економічний ефект роботи:

$$E_p^y = E_3^y - E_n \cdot B_p, \quad (4.5)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (0,15);

B_p – витрати на виконання роботи.

$$E_p^y = 72000 - 0,15 \cdot 32978,18 = 67053,27 \text{ грн}$$

Економічна ефективність роботи визначається коефіцієнтом ефективності E , який характеризує частку загального ефекту від розробки на умовну одиницю витрат і розраховується за формулою:

$$E = E_p^y / B_p, \quad (4.6)$$

де B_p – витрати на виконання роботи.

Підставивши значення у формулу (4.6) знайдемо коефіцієнт економічної ефективності:

$$E = 67053,27 / 32978,18 = 2,033$$

Отже, судячи з розрахованого коефіцієнта, виконання даної роботи є економічно обґрунтованим.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Розрахована планова собівартість проведення магістерської дисертації з урахуванням видів витрачених ресурсів.
2. Проведено економічний аналіз ефективності даної магістерської дисертаційної роботи та виявлено, що дане дослідження є раціональним для проведення з економічної точки зору, так як включає використання недорогих матеріалів, які широко використовуються у ливарному виробництві.
3. Обґрунтована актуальність та доцільність проведення роботи.

5 БІЗНЕС–ПРОЕКТ

5.1 Склад команди

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Інженерно-фізичний факультет. Кафедра ливарного виробництва чорних і кольорових металів.

Лідер команди:

Скрипник А.І. (студентка)

Генератор ідей:

Ямшинський М.М. (к. т. н., доц.)

Опонент:

Ковальчук О.Г. (аспірант)

Маркетолог:

Смірнова Я.О. (студентка)

Технолог:

Поліно В.П. (студент)

5.2 Назва проекту

«Жаростійкі сталеві виливки з диференційованими властивостями поверхні»

5.3 Короткий опис проекту

Розроблено технологію виготовлення сталевих виливків зі спеціальними структурою та властивостями, які працюють в екстремальних умовах, а саме в умовах підвищених температур.

Застосування розробленої технології виготовлення жаростійких сплавів на основі заліза вирішує наступні задачі:

- підвищення часу експлуатації виробів;

- зменшення затрат на високолеговані сплави;
- зменшення часу на виготовлення жаростійких деталей.

Розроблена технологія вирішує проблему швидкого утворення окалини на частинах обладнання, яке працює при підвищених температурах, шляхом збільшення тривалості експлуатації обладнання, скорочення кількості та тривалості технологічних зупинок обладнання, пов'язаних з ремонтом та заміною окиснених частин.

Основну номенклатуру виробів складають стандартизовані деталі пічного обладнання, подові плити, жарові труби в газотурбінних установках, пальники а також вироби, виготовлені за індивідуальним замовленням.

За видом проект відноситься до проектів «новий продукт на існуючий ринок».

Споживчий сегмент – B2B.

5.4 Бізнес-модель

5.4.1 Цінний продукт

Деталі, виготовлені зі сплавів на основі заліза:

- пічне обладнання;
- подові плити;
- пальники;
- жарові труби в газотурбінних установках;
- за індивідуальним замовленням.

5.4.2 Сегмент споживачів

Споживачі ринку дрібного сегментування категорії B2B. Підприємства (зазвичай для підприємств хімічної, металургійної промисловості та енергетичного машинобудування), які використовують обладнання з вимогами до роботи при підвищених температурах та в агресивних середовищах.

ТОВ «ІНТЕРХІМ-БТВ»

ТОВ «УКРМЕТАЛІННОВАЦІЯ»

ПАТ «ХАРКІВСЬКИЙ ТРАКТОРНИЙ ЗАВОД ІМ.ОРДЖОНІКІДЗЕ»

ПАТ «ХРОМ-СТАЛЬ»

5.4.3 Канали збуту

Застосовуються прямі канали збуту, пов'язані з переміщенням товарів і послуг без участі посередників. Вони забезпечують доступ до кінцевого споживача, що дає такі вагомі переваги, як можливість збирання маркетингової інформації та прямий вплив на споживачів, але потребує значних фінансових коштів. Прямі канали використовують переважно ті виробники, які намагаються контролювати свою маркетингову програму і працюють на обмежених цільових ринках. Зазвичай виробник зацікавлений збувати свою продукцію безпосередньо споживачам за наявності власних регіональних складів.

Збутова діяльність промислового підприємства із застосуванням прямого маркетингу може проводитися через збутові оптові бази, склади й оптові контори самого виробника. Може здійснюватися збут через інтернет-ресурси (сайт заводу виробника).

5.4.4 Взаємодія зі споживачами

Формується база лояльних споживачів, створюють і послідовно підтримують на високому рівні їх досвід споживання продукту, зосереджуючись на областях, що дійсно мають найбільше значення для споживачів. Завод не просто працює над підвищенням залучення до роботи працівників своєї компанії, але створює внутрішню культуру високих досягнень, яка дозволяє надавати щось більше, ніж стандартний набір виробів та технологій, що і стимулює подальше зростання бізнесу.

5.4.5 Прибуток (монетизація)

Отримання прибутку від продажу готових виробів основної номенклатури та індивідуальних замовлень, а також від впровадження своєї технології для інших виробників.

5.4.6 Ключові види діяльності

1. Наукова діяльність – це інтелектуальна творча діяльність, спрямована на одержання та використання нових знань. Основними її формами є фундаментальні та прикладні наукові дослідження.

2. Виробництво виливків – певний технологічний процес отримання виливків певної конфігурації та із заданими технологічними та механічними властивостями.

3. Маркетингова діяльність – являє собою творчу управлінську діяльність, завдання якої полягає в розвитку ринку товарів, послуг і робочої сили шляхом оцінки потреб споживачів, а також у проведенні практичних заходів для задоволення цих потреб.

5.4.7 Ключові ресурси

Матеріальні – шихтові матеріали, формувальні матеріали, феросплави. Технологія виробництва. Охоронні документи (патенти). Науково-технічні працівники.

5.4.8 Ключові партнери

Постачальники сировини для виробництва: ТОВ «Ливарні матеріали ЛТ», ТОВ «МЕТПРОМСЕРВІС», АТ «ОЗММ», ТОВ «ЗТМК».

Постачальник енергоресурсів – ПАТ «Київенерго».

Підприємство, яке надає виробничу базу: ливарний цех.

Партнери з надання маркетингових послуг – ТОВ «Kiev Leading Media», ТОВ «SEO – studio».

Партнери з надання логістичних та маркетингових послуг: оптимізація та просування сайтів «SEOOWL», «Аналітікс Плюс», «DELPOST».

5.4.9 Витрати

- витрати на оренду промислових потужностей;
- придбання матеріалів;
- доставка матеріалів;
- електроенергія;
- оброблення і пакування готового продукту;
- заробітна плата;
- логістика;
- маркетинг;
- підтримка інтернет ресурсів.

5.5 Споживчі властивості товару

Вироби, виготовлені за даною технологією, мають підвищений час експлуатації виробів і тим самим вирішують проблеми споживача, пов'язані з витратами на ремонт та зупинки обладнання та мають кращі експлуатаційні та економічні показники. Варіативність номенклатури виготовлених виробів дозволяє значно розширити межі їх використання в різних галузях промисловості та робить їх більш конкурентоспроможними, в порівнянні з існуючими на ринку аналогами.

5.6 Дослідження ринку

За результатами аналізу існуючого ринку продукції аналогічного призначення можна зробити висновок, що:

- матеріалами для виготовлення литих деталей клапанів двигунів внутрішнього згоряння, пічного обладнання, соплових апаратів і жарових труб в газотурбінних установках тощо є дорогі і дефіцитні високолеговані сплави.
- річний світовий обсяг виробництва виробів аналогічного призначення становить близько 180 млн. \$;
- основними технологіями для виробництва виробів аналогічного призначення є об'ємне легування, електрохімічні покриття та наплавлення;
- технології, які використовуються на сьогодні для виробництва виробів аналогічного призначення програють за показниками економічності та експлуатаційними показниками розроблених технологій.

5.7 Дослідження конкурентного оточення

Вироби аналогічного призначення виробляють підприємства як України, так і закордону. Було проаналізовано продукцію підприємств України, країн СНД та КНР, як найбільш вірогідних конкурентів. Переваги нашого

продукту за якістю та економічністю наразі дозволяють йому зайняти свою нішу на ринку аналогічних продуктів.

Ймовірні конкуренти в Україні: ТВД «Булат», ПАТ «Мотор Січ».

За кордоном: Wuxi Liangxin Steel Co, Ltd.

5.8 Маркетингова стратегія просування

Маркетингова стратегія просування проекту складатиметься з:

- просування проекту в мережі Internet;
- участі у галузевих виставках та конференціях;
- проведення презентацій для потенційних покупців;
- зустрічей безпосередньо на підприємствах, які користуються запропонованою продукцією та проведення демонстрацій та «особистих продажів» виробів;
- поступовим опануванням ринку України та виходом на міжнародний ринок.

5.9 Елементи фінансового плану

5.9.1 Опис бізнес-проекту

Мета проекту – отримання прибутку шляхом продажу виробів, виготовлених за розробленою технологією, які працюють в умовах підвищених температур та агресивних середовищ.

Актуальність проекту – оскільки існує проблема швидкого руйнування частин обладнання, яке працює при підвищених температурах та в умовах агресивних середовищ, то для її вирішення розробляють нові технології та матеріали, які збільшують тривалість експлуатації обладнання та скорочують кількість технологічних зупинок обладнання.

5.9.2 Опис товару/послуги/технології

Номенклатуру виробів складає широкий перелік деталей, що працюють в умовах підвищених температур та агресивних середовищ:

- пічне обладнання;
- подові плити;
- пальники;
- жарові труби в газотурбінних установках;
- деталі за індивідуальним замовленням.

5.9.3 Маркетинг та продаж

Цільовий сегмент – B2B. Підприємства хімічної, суднобудівельної, авіаційної, медичної і харчової промисловості, атомного і енергетичного машинобудування.

Маркетингова стратегія просування проекту на початкових етапах включає в себе:

- просування проекту в мережі Internet;
- участь у галузевих виставках та конференціях;
- проведення презентацій для потенційних покупців.

Для продажу застосовуються прямі канали збуту:

- безпосередній контакт з потенційними покупцями;
- збут через інтернет-ресурси.

5.9.4 Фінансовий план

На поточному етапі існування проекту фінансовий план у необхідному обсязі не прораховувався. Однак, розраховано, що заплановані інвестиції для впровадження у виробництво та виробництва готових виробів в межах одного підприємства-виробника становлять:

– оренда промислової потужності:	5000 \$
– відпрацювання технології в умовах виробництва:	2000 \$
– ресурсозабезпечення:	6000 \$
– затрати на логістику, маркетинг, з/п:	5000 \$

Поточна ситуація по проекту:

- проект на стадії відпрацювання та удосконалення технології в лабораторних умовах;
- в наявності є дослідні зразки;
- отримані патенти на корисні моделі.

5.9.5 Резюме

Проект призначений для вирішення проблеми швидкого руйнування частин обладнання, яке працює в умовах підвищених температурах та агресивних середовищ шляхом підвищення експлуатаційних та економічних характеристик цих частин, виготовлених за розробленою технологією.

Заплановані інвестиції для впровадження у виробництво на одному підприємстві становлять 18000 \$.

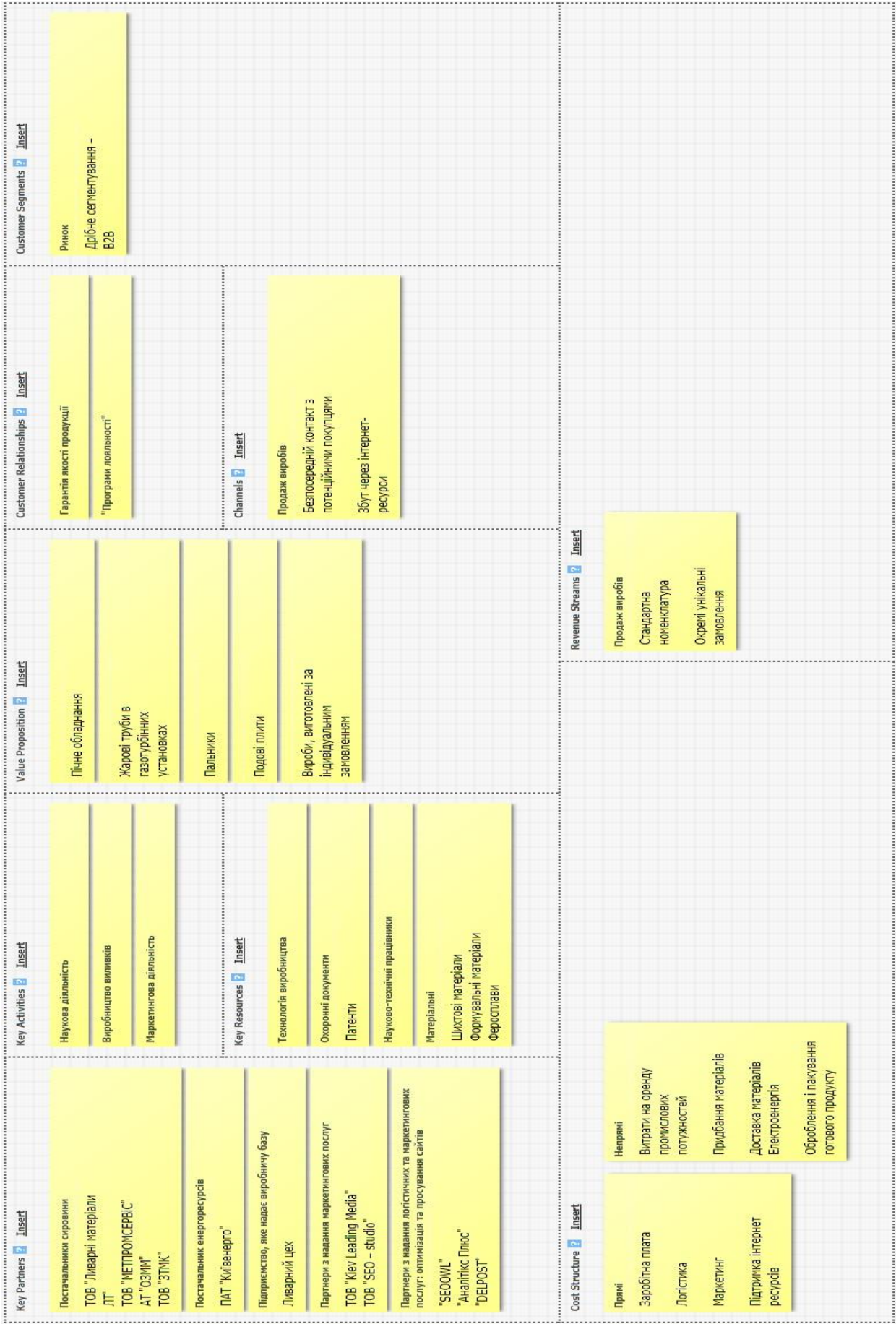


Рисунок 5.1 – Бізнес-модель

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Поверхнєве легування дає можливість істотно заощадити дорогі і дефіцитні феросплави, які використовують під час об'ємного легування.

2. Для жаростійкого поверхневого легування краще використовувати механічну суміш алюмінію і ферохрому, оскільки ці елементи під час експлуатації при високих температурах та в агресивних середовищах утворюють на поверхні виробу захисні плівки Cr_2O_3 , Al_2O_3 або шпінелі $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

3. Для отримання якісного легованого шару необхідної товщини і твердості при поверхневому легуванні доцільно використовувати в якості легуючих покриттів окремі феросплави або механічні суміші з розмірами частинок 0,2 і 0,315 мм. Покриття з розмірами частинок 0,4 і 0,63 мм можна використовувати при виробництві литих заготовок з товщиною стінок понад 30 мм, при цьому слід здійснювати максимально можливе для конкретних виробничих умов перегрівання металу перед заливкою його в форми.

4. Для отримання легованого шару максимальної товщини в якості зв'язувальних компонентів легувального покриття необхідно використовувати рідке скло щільністю $1,0 \text{ г / см}^3$, що на високому рівні забезпечує чистоту легованого шару. Кількість рідкого скла має варіюватися в залежності від фракції компонентів легуючого покриття в межах 3...6%.

5. В якості наповнювача краще використовувати високовуглецевий ферохром.

6. Для досягнення максимальної товщини легованого шару необхідно використовувати легувальне покриття товщиною 5...7 мм, яке можна наносити на поверхні ливарних форм або стрижнів у вигляді обмазок.

7. Для отримання якісного легованого шару максимальної товщини в якості сполучних компонентів легуючого покриття необхідно використовувати розведений технічний лігносульфонат або розбавлене рідке скло щільні-

стю $1,0 \text{ г / см}^3$. Слід враховувати, що ЛСТ призводить до забруднення легованого шару неметалічними включеннями.

8. Товщину легуючого покриття і його гранулометричний склад слід вибирати виходячи з необхідної товщини легованого шару на реальних деталях, можливості перегрівання металу і підігрівання форм і стрижнів перед заливкою їх розплавом.

9. Рекомендовані параметри технологічного процесу поверхневого легування в повній мірі можуть бути використані в виробничих умовах для виготовлення жаростійких деталей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гудремон Э.А. Специальные стали. – М.: Металлургия. Т.1, Т.2 1966. – 737 с.
2. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1963. – 600 с.
3. Гаврилюк В.П., Марновский Е.А. Литые железохромистые сплавы. – К.: Процессы литья при участии МП «Информлитъе», 2001, – 260 с.
4. Федоров Г.Е., Ямшинский М.М., Платонов Е.А., Лютый Р.В. Стальное литье.: Монография / - К.: НТУУ «КПИ», ПАО «Випол», 2013. – 896 с.
5. Oxidation and corrosion behavior of Fe-Cr and Fe-Cr-Al alloys with minor alloying additions Materials Science and Engineering: A, Volume 241, Issues 1-2, January 1998, Pages 264...276.
6. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны – М.: Металлургия, 1976. – 286 с.
7. Францевич И.Н. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов. – К.: Гостехиздат, 1963. – 323 с.
8. Эмингер Э., Вебер К. Производство отливок из специальных сталей. – М.: Мосгиз, 1960. – 160 с.
9. Оболенцев Ф.Д. Физико–химия и технология композиционного литья. – Одесса: ОПИ, 1984. – 97 с.
10. Борщ В.Г. Получение композиционных отливок с качественной поверхностью при использовании металлокерамических оболочек: Автореферат диссертации канд. технических наук. – КПИ, 1981. – 20 с.
11. Богачев В.М., Грузин В.Г. Легирование поверхности отливок при затвердевании // Литейное производство, 1957, №6. С. 18...22.
12. Ковальчук А.Г., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. Исследование процессов жаростойкого поверхностного легирования отливок./ Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (41), 2017. С. 44...50.
13. Михайлов А.М., Грузин В.Г. Поверхностное легирование фасонных отливок // Литейное производство, 1957, №6. С. 18...20.

14. Клычков В.В., Фурман Е.Д., Тересков Ю.И. Поверхностное упрочнение деталей машин работающих в условиях абразивного изнашивания. / Пути упрочнения изделий.– М.:1979, – С. 153...158.
15. Фруль В.М. Условия образования и свойства износостойкого композиционного слоя. / Литейное производство, 1972, №4. С. 22...24.
16. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Куринин В.Г. Получение биметаллических отливок при использовании металлокерамических каркасов. Информ. Листок ОЦНТИ №86-24. Одеса,1985. – 12 с.
17. Пробе А.А., Шестопап В.Н., Заславский М.Л. Производство армированных и биметаллических отливок,. Итоги науки и техники, серия ТОЛП-ВНИИТИ,1979. – 222 с.
18. Смеляков Н.Н. Армированные отливки. – М.:Машгиз, 1958. – 270 с.
19. Бенедетто А.Д., Николаис Л. Поверхности раздела в композиционных материалах. – М.: Металлургия, 1982. – 170 с.
20. Шкленник Я.И., Озеров В.А. Литье по выплавляемым моделям – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
21. Ващенко К.И., Жижченко В.В., Фирстов А.Н. Биметаллические отливки железо-алюминий – М.: Машиностроение, 1966. – 175 с.
22. Горшков А.Л., Рабинович А.А. Поверхностное легирование при затвердевании. / Литейное производство, 1957, №5. С.20...24.
23. Берг П.П., Гусев В.В. Способ поверхностного легирования чугуновых отливок. Авторское свидетельство 11766 класс 31с (от 12 мая 1958 г).
24. Волков Ю.А. Определяющие факторы процесса поверхностного легирования отливок. / Сб. Приложение теплофизики в литейном производстве Минск: Наука и Техника, 1966. С. 18...22.
25. Тихий В.Л. Исследование механизма и разработка технологии процессов поверхностного легирования отливок (Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К.: КПИ, 1975. – 21 с.
26. Богачев И.Н. Лузин П.Г. Колеса Грифина. –М.: ОПТП-НКТП. – Свердловск 1987. – 120 с.

27. Вейник А.Н. Термодинамика литейной формы. – М.: Машиностроение, 1968. – 174 с.
28. Лакедемонский А.В. Биметаллические отливки. – М.: Машиностроение, 1964. – 220 с.
29. Тен Э.Б. Исследование смачиваемости легированных паст железо - углеродистыми расплавами. Автореферат, – М. МИСиС. 1971. – 21 с.
30. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлургических расплавах. – К.: Наукова думка, 1972. – 180 с.
31. Омельченко В.Г. Экзотермический процесс поверхностного легирования отливок. // Литейное производство, 1965, №6. С. 20...22.

ДОДАТКИ